

### **ВОВЕД**

Современото рударство содржи две производни дејности: *Експлоатација на минералните сировини и Минерална технологија*.

Првата дејност, користејќи го високостручното рударење, од геолошки откриените билансни или вонбилансни ресурси ја откопува корисната минерална маса, а втората, Минералната технологија (во поранешната терминологија *Подготовка на минералните сировини*), масата је преработува, отстранувајќи ги некорисните минерални компоненти, во краен и комерцијален производ за кој се заинтересирани металургијата, неорганска технологија и други технологии и корисници на минерални сировини.

Минералната технологија од областа на рударството има физички карактер, бидејќи во процесите што таа ги применува, не се менува хемискиот состав на минералите и не се разградуваат нивните кристални решетки, каков што е случајот кај металургијата, хемиската технологија или пак хидрометалургијата, иако последнава како комбиниран процес или самостоен процес често се применува во Минералната технологија.

Минералната технологија во основа се остварува преку следните три основни операции: *механичко ситнење* (дробење и мелење), *класирање и концентрација* на разнородни минерални компоненти во соодветни производи : **концентрати** (комерцијални производи) и **отпадок** (јаловина).

Во современата минерална технологија се почесто се оди кон примена на програмски пакети и симулација на постојните процеси со цел да се овозможи прв чекор кон евентуална автоматизација на технолошките процеси во минералната технологија.

Применетите компјутерски програми за пресметка на технолошките индикатори во минералната технологија, компјутерските програми за пресметки на искористување, ефикасност на раздвојување на мономинерални или полиминерални сировини, како и компјутерските програми за целосно прикажување на часовни, дневни, месечни и годишни извештаи при флотациска концентрација на минералните сировини, покажуваат одлични резултати во симулацијата на сите процеси во минералната технологија.

Информациите за повеќето циклуси во минералната технологија, како што се технолошките показатели за масено искористување, искористување или ефикасност, односно големините на параметрите во симулациските модели од процесните

единици во циклусот, изискуваат информации за количините или содржините за влезните или излезните параметри во затворениот циклус. Во повеќето циклуси мерењата се извршуваат на влезот во процесот или циклусот, односно на излезот на произведените продукти или пак од случај во случај во меѓуинтервалните продукти. Големините на преостанатите параметри се пресметуваат или изведуваат од другите измерени карактеристики такви како што се распределбата по содржини или крупност на пробите собрани или земени во соодветни точки на циклусот. Истражувањето на ефикасноста на циклусот со примена на математичка симулација вклучува:

- Пресметка на целосниот материјален биланс на циклусот од некомплетните податоци во постројката;
- Пресметка на моделните параметри од комплетната мрежа на податоци во постројката;
- Симулација на циклусот со помош на персонален компјутер проследен со оптимирачки алатки.

Целосната пресметка на податоците всушност е комплексна и потребно е целосно проучување на техниките кои можат да се применат, вклучувајќи ги нивните предности или недостатоци, што би било предмет на понатамошно изучување или елаборирање.

За таа цел во оваа проектна задача се прави обид да се програмираат, поедноставни или посложени циклуси на мелење и класирање со цел да се избегнат макотрпните пресметки и решавања на проблемите кои се бараат од поставената задача. Програмите користат Basic поддршка која едноставно може да се трансформира во посовремен пакет.

Програмите за двостадиијално мелење со комбинирано класирање на механички класификатор и хидроциклон е направен во **Visual Studio 2008®** и овозможува брзо и ефикасно пресметување на повеќе големини поврзани со проектната задача и дава можности за имплементирање и програмирање на слични или посложени проблеми кои се појавуваат во индустриската пракса на Минералната технологија.

### 1.0 Општи поими за процесите на уситнување

Доколку дадено механичко ситнење дава производ со *горна гранична големина (г.г.г.)* на зрната над 5 mm, тоа се наречува **дробење**, а доколку г.г.г. на зрната е помала од 5 mm, се наречува **мелење**.

Машините за дробење - **дробилките** од машините за мелење - **мелниците**, конструктивно се разликуваат по тоа, што дробечките површини кај нив, било тие да работат активно или на празно, не се **меѓусебно допираат**.

Освен преку гранулометриските криви и новосоздадената површина, резултатите од дробењето и мелењето се оценуваат и преку **степенот на ситнење**. Тој претставува однос помеѓу **максималната** или **средната** крупност на зрната **пред и после** ситнењето:

$$i = \frac{D_{\max}}{d_{\max}} = \frac{D_{sr}}{d_{sr}} = i_1 \times i_2 \times i_3 \dots i_n \quad (1)$$

Во праксата на минералното инженерство механичкото ситнење се осварува во повеќе **стадиуми**, при што дробењето во два, три или четири, а мелењето обично во еден или најчесто два (**грубо и фино мелење**).

Табела 1 . Крупност на суровината пред и после ситнење

СТАДИУМИ	КРУПНОСТ (mm)	
	ПРЕД СИТНЕЊЕ	ПОСЛЕ СИТНЕЊЕ
Крупно дробење	1200-500	350-100
Средно дробење	350-100	100-40
Ситно дробење	100-40	40-10
Грубо мелење	40-10	5-2
Фино мелење	5-2	< 1

Дробењето обично се изведува по сув, а мелењето по мокар пат. Ако во откопаната минерална сировина е присутна глина, дробењето може да биде мокро. Исто така, ако корисниците на јаглен во термоелектраните инсистираат сомлениот производ да е сув или методите на концентрација условуваат материјалот да е сув (електростатска или сува магнетска концентрација), мелењето може да биде суво.

Дробилките можат да работат:

- во отворен циклус;
- во затворен циклус со сита или механички класификатори;

Ефикасноста на дробилките и мелниците со која тие работат се одредува преку уситнетата количина на материјал по единица потрошена електрична енергија:

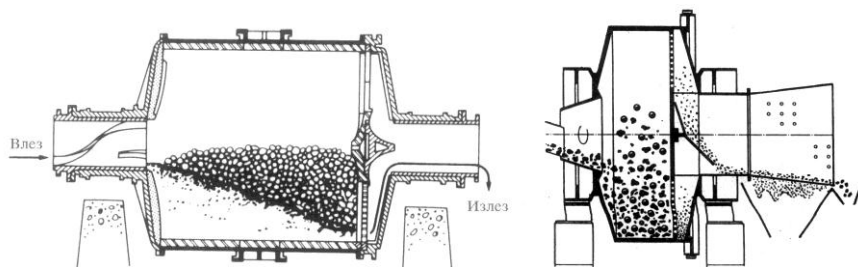
$$E = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Реципрочната вредност на ефикасноста ја дава единечната потрошувачка на електрична енергија ( $kWh/t$ ).

Според механичко-конструктивните особини, во минералното инженерство се користат следните **дробилки**: виличеста (чељусна); конусна; со валци и ударни (на удар или одбој); а од **мелниците**, најчесто цилиндрични, со или без дробечки тела (автогено мелење).

### 1.1 Машини за мелење

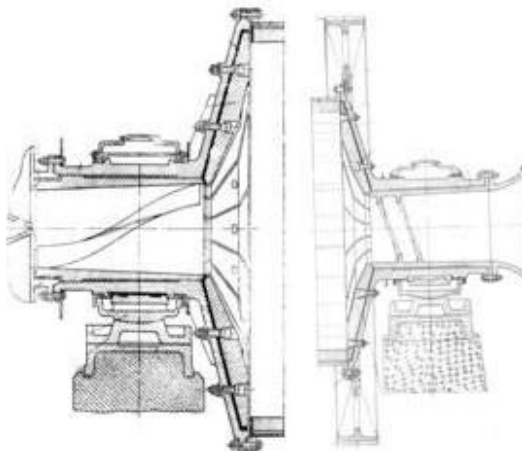
Завршниот стадиум на раскривањето на минералните сировини, **мелењето**, во праксата на минералното инженерство се остварува во цилиндрични мелници со дробечки тела: **челични шипки** (грубо мелење), и **челични топки** (завршно или фино мелење).



Слика 1 . Мелница со топки и автогена мелница

Вложувањето и експлоатациските трошкови се многу големи, па во последно време се користат мелници без дробечки тела, тн. **автогено мелење** во автогени мелници, во кои поситните парчиња се ситнат од покрупните парчиња. За голем број

на минерални сировини автогеното мелење дава подобро раскривање, поквалитетни технолошки показатели и намалени трошкови по тон финален производ (концентрат).

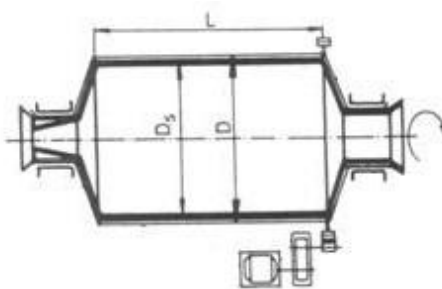


Слика 2 . Влезно и излезно грло од мелница

Цилиндричните мелници претставуваат цилиндер (барабан) кој ротира околу својата осовина. На двете челни страни центрично се вградени **влезно** и **излезно грло**, низ кои во мелницата се доведува и излегува сировината. При ротирањето во лагерите, дробечките тела заедно со претходно здробената минерална сировина, која во мелницата е доведена низ влезното грло, се издигаат на определена висина, од каде (зависно од брзината со која мелницата ротира) тие **лизгаат**, се **тркалаат** или **параболично паѓаат**. Мелењето се остварува **под удар** (дробечките тела кога паѓаат параболично) или **смолкнување** (триење меѓу слоевите, кога дробечките тела се тркалаат), а одведувањето на сомлената сировина низ излезното грло се остварува благодареејќи на висинската разлика помеѓу влезното и излезното грло.

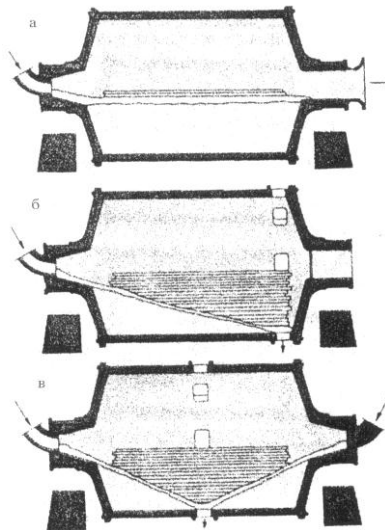
Во праксата на минералното инженерство се применуваат разни конструкции кои меѓусебно се разликуваат по:

- видот на мелнички тела;
- формата на цилиндричниот дел;
- начинот на мелење;
- начинот на кој сомлената сировина се одведува од мелницата;



Слика 3 . Цилиндрична мелница

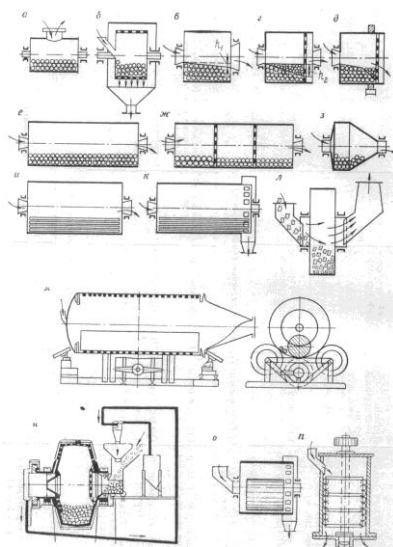
Цилиндричните мелници со мелнички тела, можат сомлената суровина да ја одведат низ **решетка**, или директно-**централно празнење**. На останатите слики се прикажани автогени мелници-**каскадни мелници** и **аерофалл мелници**.



Слика 4 . Видови на цилиндрични мелници

Висинската разлика кај мелниците со **решетка**, помеѓу влезното и излезното грло, е поголема од мелницата со **централно празнење**, а со тоа брзината на одведување на суровината низ решетката, од каде таа се подига со **лифтери**, е поголема. Како последица на тоа (суровината покусо време се задржува во мелницата) овој вид на мелници се користи за **грубо** (покрупно) мелење. Кај мелниците со централно празнење, поради помалата висинска разлика брзината на одведување на суровината е помала, благодарейќи на тоа, тие (цилиндрични мелници со челични топки) се користат за **завршно** (fino) мелење. Цилиндричните мелници со челични шипки, кои се користат за **грубо-примарно** мелење, од претходните имаат поголема висинска разлика (диаметарот на излезното грло е поголем). Цилиндричните мелници со **решетка** во праксата на минералното инженерство работат во **затворен круг** со **механички класификатори** или **хидроциклони**. Тоа е поради недоволно сомлените парчиња повторно да се вратат на домелување. Во затворен круг работат и автогените мелници- **каскадни мелници**, кога мелењето е мокро, односно со пневматски класификатори, кога мелењето е суво- **аерофалл мелници**. Кај цилиндричните мелници димензиите се искажуваат преку дијаметарот ( $D$ ) (без дебелината на плочите за облога) и должината ( $L$ ) на цилиндерот (барабанот).

## **1.2 Конструкции на мелници**

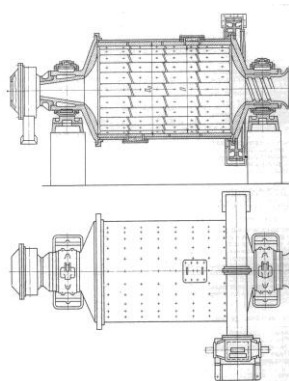


Слика 5. Разни видови на машини за мелење

## **1.3 Мелници со топки**

### **1.3.1 Мелници со топки за мокро мелење-централно празнење**

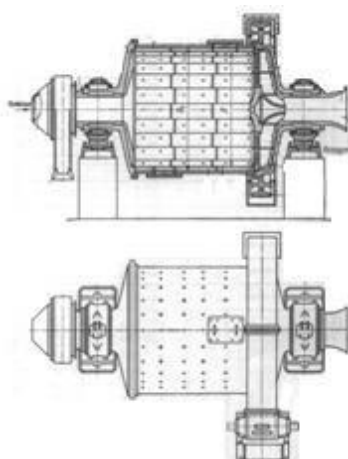
За илустрација таква мелница е прикажана на сликата. Прикажана е цилиндричната обвивка, со заварени фланши на двата краја, за кои со навртки се зацврстени страничните капаци. Во својот средишен дел капаците завршуваат со цилиндрични грла, на кои лежи целата мелница во лагерите. Суровината за мелење се доведува низ грлото, со помош на хранилка. Цилиндричната обвивка, страничните капаци и грлата се обложен со заштитни плочи. Мелницата ротира со помош на запчаникот, монтиран на цилиндричната обвивка на нејзиниот излезен крај, и малиот запчаник, сврзан со електромоторот преку редуктор. На цилиндричната обвивка има еден или два отвори, кои служат: за преглед на челичните топки при ремонт; за менување на обложните плочи. Отворите се покриени со капаци. Влезното обложено грло има конусна форма, а излезното цилиндрично, со поголем дијаметар, како би се создала висинска разлика меѓу нивото на пулпата на влезниот и излезен отвор.



Слика 6. Мелница со топки

При вртење на мелницата во лагерите, челичните топки и суровината што се меле се подигаат на одредена висина, за да потоа челичните топки лизгаат, се тркалаат или паѓаат врз обложните плочи во мелницата. Според тоа, мелењето се остварува за сметка на судрувањето на челичните топки со суровината, односно за сметка на триењето помеѓу слоевите што се тркалаат. Движењето на суровината од влезниот до излезниот крај се остварува со водениот проток, благодарение на висинската разлика меѓу нивото на пулпата на влезниот и излезен отвор. Како таа е релативно мала, брзината на протокот е исто така мала. Од тука и особеноста на овие мелници да служат за мошне фино мелење (до 95% и повеќе -  $0,074\text{ mm}$ ), бидејќи времето на задржување на материјалот во мелницата е релативно подолго.

### **1.3.2 Мелници со топки за мокро мелење-празнење низ решетка**



Слика 7. Мелница со топки

Овој тип на мелници со топки се наменети за погрубо мелење и задолжителна работа во затворен круг со хидрауличен класификатор. Од претходниот тип



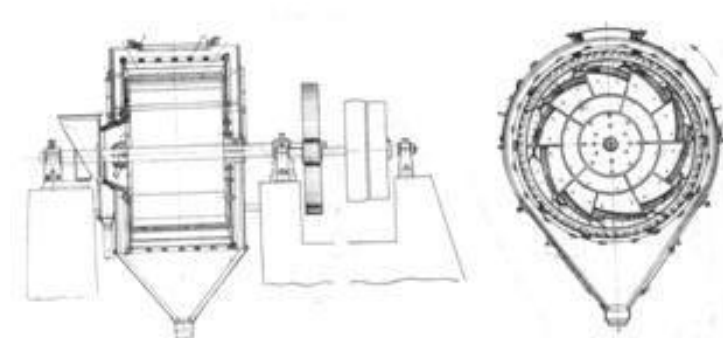
конструктивно се разликуваат само со вградената решетка и лифтерите пред излезното грло, како што се гледа на сликата. Заради оваа своја конструктивна особеност, мелниците со топки со празнење преку решетка имаат мошне побрз проток на пулпата, а со тоа и погрубо мелење. Имено, нивото на пулпата пред самата решетка е мошне мал. Брзината на протокот се регулира преку количината на пулпата во единица време (почетен материјал плус вода), а кога мелницата работи во затворен круг со хидраулички класификатор, преку количината на циркулацискиот товар. Лифтерите, радијалните ребра со спирална форма, просторот меѓу решетката и страничниот капак го делат во неколку комори, со излезни отвори близу централната ска на мелницата. При вртењето на мелницата ја подигаат пулпата до нивото на излезното грло, односно овозможуваат пулпата што преминува низ отворите на решетката да се изведе надвор од мелницата.

Мелниците со топки од двата типа се карактеризирани со внатрешниот дијаметар на цилиндричната обвивка, без обложните плочи, и нејзината должина.

Полнењето со челични топки е до висината на излезното грло кај првиот, односно до висината на влезното грло кај вториот тип. Дијаметарот на челичните топки се движи од 25-30 до 100-120 mm.

#### **1.4 Мелници со топки за суво мелење**

##### **1.4.1 Мелници со топки со периферно празнење**

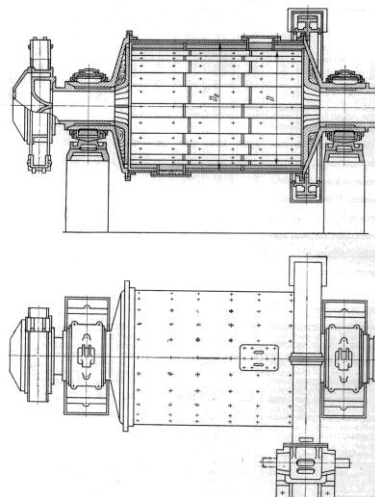


Слика 8. Мелница со топки со периферно празнење

На *слика 8.* е даден надолжен и попречен пресек на овој тип мелница за суво мелење. Агрегатот претставува комбинација на мелница и цилиндрично ротациско решето. Обложните плочи, што го оградуваат просторот за мелење во внатрешноста на мелницаа, се поставени така да меѓу секциите се формираат зазори низ кои сомленаа суровина поминува во просторот меѓу облогата и цилиндричниот перфориран сад. Подрешетниот производ, доволно сомелената суровина, се одведува низ инката, а надрешетниот, низ отворите на облогата, се враќа на домелување. Со цел да се избегне запрашувањето на работната околина, мелницата е херметички затворена.

### **1.5 Мелници со прачки**

#### **1.5.1 Мелници со прачки за мокро мелење**



Слика 9. Мелница со прачки

Од мелниците со топки за мокро мелење се разликуваат со глемината на излезното грло. Тоа е поголемо, со што се намалува нивото на пулпата на излезниот крај, а со тоа и брзината на потокот на суровината низ мелницата. Кај покрупните мелници со прачки дијаметарот на излезното грло изнесува 1200 *mm*, со што низ него лесно се влегува во мелницата. Челичните прачки, како мелнички тела, имаат цилиндрична форма, со дијаметар од 40-120 *mm*. Од должината на цилиндричната обвивка во мелницата тие се пократки за 25-50 *mm*. При вртењето на мелницата, со брзина за приближно една четвртина помала од брзината на мелниците со топки, челичните прачки се тркалаат едни преку други во слоеви. Суровината во нив помалку се пресомелува од следната причина: додека челичните топки по рудните зрна удираат во *една точка*, челичните прачки тоа го чинат по *издолжена површина*, давајќи при тоа покрупно сомелени зрнца. Освен тоа, заради должината на прачките, веројатноста несомелени крупни зрна да поминат низ целото работно пространство е помала отколку кај мелниците со топки. Од тука сомелениот производ во мелниците со прачки содржи помала количина на крупна фракција, во споредба со мелниците со топки.

## **2.0 Технологија на цилиндрични мелници**

Мелењето во процесот на подготовката на минералните сировини претставува завршниот стадиум во “раскривањето” и “откривањето” на минералните зрна и исклучително се остварува во хоризонтални цилиндрични мелници пополнети со мелнички тела: челични шипки, челични топки или крупни парчиња од минералната сировина која се уситнува (случај на автогено мелење).

Технолошките показатели: производноста-часовниот капацитет и ефикасноста на мелењето ќе бидат високи, доколку проектираниот технолошки процес **правилно** се води, односно доколку влијанието на следните фактори доследно се почитуваат:

- *конструктивните особености на мелницата;*
- *карактерот на мелничката средина-мелнички тела;*
- *карактерот на материјалот што се уситнува;*
- *количината на вода при мокро мелење;*
- *циркулацискиот товар-кружната шаржа кога мелницата работи во затворен циклус со механички класификатор или хидрауличен хидроциклон;*
- *одредување на единична (специфична) површина на зрнест материјал.*

### **2.1 Конструктивни особености на мелницата**

Конструктивните особености на дадена цилиндрична мелница се: должината и дијаметарот, типот на облогата, конструкцијата и големината на отворите на решетката за празнење и брзината на вртење на мелницата. Од пресметките за капацитет е очигледно дека тој со зголемувањето на волуменот расте побрзо, ако зголемувањето на зафатнината се должи на зголемен дијаметар.

$$Q = k.L.D^{2,5-2,6} = k.V.D^{0,5-0,6} \quad (t/h) \quad (3)$$

Тоа е разбирливо бидејќи во мелницата со поголем дијаметар дробечките тела се издигаат на поголема висина и имаат поголема кинетичка енергија. Поради тоа, во примарното мелење е потребна примена на мелница со поголем дијаметар.

## **2.2 Облоги за цилиндричните мелници**

Како заштита од ударите, тркалањето и триењето на мелничките тела, цилиндричните мелници се обложуваат со метална облога. Таа треба да ги задоволува следните барања: да е долготрајна и ефтина, лесно да може да се заменува и да има соодветна форма.

Обложните плочи се леат од квалитетни легирани челици, нај-често со 12% манган. За примарно мелење се користат профилисани одлеани плочи, а за секундарно мелење плочи со рамна површина, или пак во зависност од механичките режими на мелење - првите се користат за водопаден и комбиниран режим, а вторите за каскаден режим.

Абењето на обложните плочи зависи од карактерот на материјалот што се меле и од самиот материјал од кој тие се направени. Поголемата почетна дебелина временското користење на мелницата го прави поголемо, но за сметка на нешто намелен капацитет. Потенката облога има спротивен ефект - почести застои, но со зголемен капацитет на мелницата. Од тие причини, најпогодната дебелина се одредува за секој случај посебно. Релевентни фактори при пресметката се: дијаметарот на мелницата, дебелината на обложните плочи, времен-ската потрошувачка на обложните плочи ( $mm/ден$ ). Според вообичаените пресметки, потенката обложна плоча која обезбедува поголем капацитет ќе има предност, ако времето за два застои не е поголемо од 33 дена. Во практиката, замената е механизирана, па застои се прават секој трет или четврт месец.

## **2.3 Брзина на вртење на мелницата**

Со порастот на брзината на вртење расте и производноста-капацитетот на мелницата. Ефикасноста на мелницата искажана преку тони сомлен материјал по киловатчас ангажирана енергија ( $t/kWh$ ) расте исто така, но до определен број вртежи, после што започнува да опаѓа.

Влијанието на брзината на вртење врз капацитетот и ефикасноста на мелницата, зависи и од коефициентот на заполнетост ( $\varphi$ ). Со порастот на коефициентот на заполнетост значително расте потрошувачката на електрична енергија. Во практиката, за најповолни коефициенти на релативна брзина на вртење ( $\psi$ ) и на заполнетост ( $\varphi$ ) кај цилиндричните мелници со челични топки се сметаат:  $\psi=75-80\%$  ;  $\varphi=45-50\%$ .

## **2.4 Карактер на мелничката средина**

Влијанието на мелничката средина - мелничките тела врз технолошките показатели на цилиндричната мелница врзано е за крупноста, формата, специфичната маса, бројот и гранулометрискиот состав на мелничките челични топки. Во употреба се обично топки со крупност од 30-150 mm. Максималната големина на челичните топки се одредува :

- зависно од максималната големина на зрната од материјалот што се меле;
- зависно од максималната големина на зрната пред и после мелењето;
- зависно од потребната кинетичка енергија за ситнење на најкрупните и најтврди зрна од материјалот што се меле;

Од сите форми што се испитувани челичните топки покажуваат најповолно влијание. Како во процесот на мелење мелничките тела се трошат-абат, односно се кршат, сплескуваат и ја менуваат својата форма, со што нивниот ефект се намалува, повремено мелниците целосно се празнат од нив и повторно шаржираат. Употребливите челични топки повторно се враќаат во мелницата. Зависноста помеѓу капацитетот на мелницата и специфичната маса на мелничките тела е следната: капацитетот расте линеарно, додека ефикасноста на мелницата останува непроменета.

## **2.5 Гранулометриски состав на мелничките тела**

Да се оствари висок капацитет на цилиндричните мелници неопходно е вкупната површина на мелничките тела да е голема. Тоа може да се оствари, ако е таа составена од голем број - со релативно мала големина - мелнички тела. Меѓутоа, мелничките тела со мал дијаметар не се во состојба да уситнат крупни и цврсти парчиња (зрна) на материјалот што се меле. Тоа значи дека во мелничката средина треба да има и крупни мелнички тела. Оттука, капацитетот и ефикасноста на мелницата ќе бидат максимални, ако гранулометрискиот состав на мелничката средина е оптимален.

Во тек на мелењето мелничките тела, триејќи се со самиот материјал што се меле и помеѓу себе, како и од повремени судари, ја намалуваат својата зафатнина т.е. маса. Како коефициентот на заполнетост ( $\phi$ ) треба да е константен, неопходно е во мелницата повремено да се дотура определена количина нови мелнички тела, како компензација за нивната потрошувачка во тој изминат период. Дотурот на нова количина се врши по еден од следниве два методи:

- *потрошувачка пресметана по основа на сомелената количина, метода која во практиката најповеќе се користи;*
- *втората метода е според количината на мелничка средина во мелницата;*

За првата метода нормативот е: килограми мелнички тела по тон сомелена руда, а за втората метода нормативот е: килограми мелнички тела на ден по тон мелничка средина во мелницата. Знаејќи го едниот и другиот норматив, а со тоа и количината која треба да се дотура, лесно може да се одреди бројот на мелнички тела што дневно треба да се дотура во мелницата. Во практиката постојат два начина за дотур на нова количина мелнички тела:

- *целата количина е составена од челични топки со ист (максимален) дијаметар, т.н. регуларно дотурање;*
- *целата количина е составена од челични топки со различен дијаметар и точно утврден меѓусебен однос, т.н. рационализирано дотурање;*

Почетната мелничка средина во секоја мелница по истек на определено време, гранулометриски се стабилизира. Нејзиниот гранулометриски состав, во моментот на дотурање на нова количина со соодветен квалитет, форма, физичко-механички и технолошки особини, зависи од самиот начин на дотурање. Доколку дотурот е регуларен, во гранулометрискиот состав преовладуваат крупни челични топки и гранулометриската крива е конвексна, а ако дотурот е рационален, наместо една конвексна гранулометриска крива, гранулометрискиот состав ќе има две или неколку криви што ќе се сечат.

Економичноста на преминот од “регуларен” во “рационален” дотур е потврдена со повеќе опити. Така, на пример во САД, со премин од регуларно дотурање на челични топки со дијаметар од  $D=75\text{ mm}$ , на рационално дотурање на челични топки  $25\% D=75\text{ mm}$  и  $75\% D=50\text{ mm}$  се овозможило зголемување на производноста на мелницата  $3000 \times 3000\text{ mm}$  за 6-8%.

## **2.6 Карактер на материјалот што се уситнува**

Производноста и ефикасноста на мелниците зависат од крупноста на влезната руда. Со порастот на крупноста, секако дека опаѓаат и двата технолошки показатели, односно растат производните трошоци на мелењето. Меѓутоа, намалената крупност на влезната руда во мелниците значи истовремено и намалена крупност на здробениот производ во претходната фаза на дробење, што од своја страна повлекува зголемени трошоци. Одредувањето на оптималната крупност на здробениот производ пред рудата да влезе во процесот на мелење е значителна компонента. Во практиката на подготовка на минералните сировини ситното дробење дава производи со крупност од  $6-75\text{ mm}$ . Примарните мелници за грубо мелење (цилиндрични мелници со челични прачки - рудник Саса) вкупните трошоци на дробење и мелење битно ги намалуваат,

во случај на соодветна оперативност во зависност од влијателните фактори, бидејќи тие упатуваат во секундарните мелници сомлен материјал со значително намалена крупност.

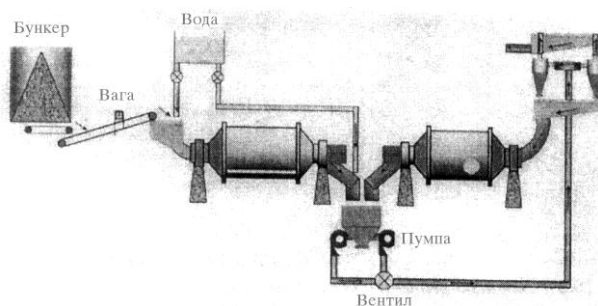
### **2.7 Количина на вода при мокро мелење**

Во практиката на минералната технологија густината на пулпата се менува во мошне широки граници од 15-40% вода и тоа: за материјал покрупен од 13 mm 25-40%, а за поситен материјал од 15-25% вода. Производноста на мелниците расте со опаѓањето на густината на пулпата. Имено, во мелниците процесот на мелење може да се остварува доколку материјалот се движи од влезниот кон излезниот крај. Движењето на мокра маса започнува дури кога има над 15-20% вода и тоа станува се полесно доколку присуството на вода е поголемо. Покрај досега кажаното, густината на пулпата влијае на потрошувачката на челични топки и на обложните плочи од мелницата. Со порастот на густината расте потрошувачката на челични топки и обложни плочи.

### **2.8 Експлоатација на цилиндрични мелници**

Распоредот на опремата за мелење и класирање е сличен за слични шеми и опреми. Пред мелниците е задолжителен бункер од кој суровината со помош на додавачи додава на транспортер со гумени ленти кои ја водат суровината во мелницата. На транспортер со гумени ленти се вградува автоматска вага која го регистрира капацитетот. Во шемите на двостадиијално мелење, мелницата со прачки во првиот стадиум работи во отворен циклус, а мелницата со топки во затворен циклус со класификатор, најчесто хидроциклони.

Во зависност од капацитетот, за класирање се користи батерија од хидроциклони кои се хранат со пулпа преку пумпа и потисен цевковод на чии краеве се изведени странични цевковод за додавање во радијално поставените хидроциклони. За таа цел се вградуваат две пумпи, од кои едната работи, а другата е резерва.



Слика 10. Приказ на цилиндрични мелници

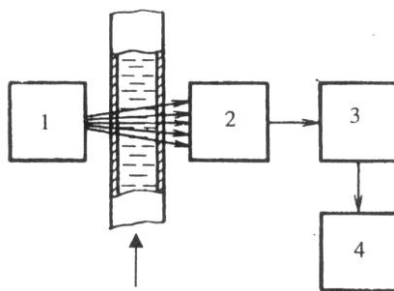


Крупноста на производот во преливот на хидроциклонот се регулира со промена на густината на преливот. Таа се регулира по пат на додавање на вода во кошот на хидроциклонската пумпа. За автоматско мерење на густината на пулпата се користат радиоизотопски густинометри, кои го користат опаѓањето на интензитетот на гама-зрачењето при премин низ пулпата. Што е поголема содржината на цврста фаза во пулпата, поголема е адсорпцијата на гама-зраците и обратно. Уредот се поставува на потисниот цевковод на пулпа со кој пулпата се уфрлува во хидроциклонот.

Додавањето на водата во кошот од хидроциклонската пумпа се врши со помош на автоматски вентил. Ако густината на пулпата се зголеми над зададената големина, тогаш на база на таа разлика се индикува соодветен електричен сигнал кој делува на автоматскиот вентил и постепено ја зголемува количината на вода која се додава во кошот на пумпата се додека густината не биде во зададената облас. При помала густина на пулпата од зададената големина, автоматскиот систем делува на вентилот така што ја намалува количината на вода. Одржувањето на густината на пулпа во зададена област обезбедува стабилна крупност на честичките во преливот на хидроциклонот.

Рамномерното додавање на суровината во мелницата и промената на капацитетот согласно на промените во крупноста и меливоста се остварува со регулација на брзината на додавачот (рачни или автоматски). Зголемувањето на крупноста на влезната суровина, при останати непроменети услови, предизвикува зголемување на крупноста на производот на излезот од мелницата и преливот од класификаторот, зголемување на циркулациската шаржа и намалување на густината на преливот. Во даден случај процесот на мелење се регулира така што се намалува масата на суровината и водата која се додава. Намалувањето на крупноста во влезот во мелницата предизвикува спротивни појави и регулацијата се сведува на спротивни дејства.

Со зголемување на отпорноста на суровината за мелење настануваат идентични појави како и при зголемувањето на крупноста, па и мерките за регулација се исти.



Слика 11. Шематски приказ за одредување на гранло-состав и густина на пулпа



Во праксата се применуваат разни начини за автоматска регулација на затворениот циклус на мелење, која ја стабилизира густината и крупноста на преливот. Преку автоматска регулација се остварува поголем капацитет на мелење за 3-10%.

При експлоатација на мелниците мора да се преземат мерки за издвојување на делови од потрошени или скршени прачки и ситни топки кои можат да излезат со пулпата. Нивното евентуално појавување во пумпата може да придонесе кон нејзино оштетување, па за нивно одвојување се користат цилиндрични сита кои се монтираат на излезот од мелницата.

### 3.0 Класирање

Теоријата на класирањето, како и на гравитациската концентрација, се засновани на законите на паѓање на телата во течна или воздушна средина, во која се врши разделувањето на минералните честичи (зрна).

Во безвоздушен простор телата паѓаат со еднаква брзина  $\vartheta = \sqrt{2gH}$ , т.е. брзината на телото не зависи од неговиот дијаметар, густина и форма. При паѓање на телото во даден флуид, тоа се спротивставува на движењето и како резултат на тоа се движи со помала брзина отколку во безвоздушен простор. При тоа, колку е поголема брзината на движењето на телото, толку е поголем динамичниот отпор на средината. Од своја страна, отпорот на средината зависи од нејзината густина и вискозитет.

Режимот на движење може да биде ламинарен и турбулентен. *Ламинарниот режим* се карактеризира со мали брзини на движење на средината во однос на телото и благо оптекување на телото од елементарните слоеви на течноста, без да се образуваат виори во неговите задни делови. При овој режим, отпорот на средината главно се определува од вискозитетот на средината, од силите на триење, кои се јавуваат во течноста како резултат на различните брзини на движење во одделните слоеви.

*Турбулентниот режим* на движење се јавува при поголеми брзини и се карактеризира со виорење на течноста во задниот дел на телото. Виорите се посилено изразени доколку е поголема брзината на оптекување, посложена конфигурацијата на телото и порапава неговата површина.

Операцијата **класирање** (разделување на уситнетите минерални сировини во класи по крупност) е застапена во сите технолошки шеми и тоа:

1. Како операција, која заедно со дробењето и мелењето минералната сировина ја подготвува за натамошна нејзина концентрација;
2. Како завршна операција, ако одредени класи на дадена минерална сировина претставуваат финален производ (јаглен, технички камен, разни неметалични сировини и слично);

Класирањето на минералните сировини во праксата на минералното инженерство се изведува:

- за крупнозрнести, според **геометрискиот облик** на парчињата;
- за ситнозрнести (сомлени производи), според масата на парчињата или според нивната **крајна брзина на паѓање**, во флуид, вода или воздух.

Првиот вид класирање се остварува на просевна површина и се нарекува **сеене**, а вториот во вода или воздух и се нарекува **хидраулична или пнеуматска класификација**.

### 3.1 Хидраулично класирање

Хидрауличното класирање наоѓа примена за различни цели.

Подготвителна операција. Се вклучува во шемите за подготовка на сировината за концентрација. Во сите фабрики за флотациска концентрација, се користи за одделување на готовиот производ по крупност од недоволно сомелениот производ. Сировината која се концентрира на клатечки маси, исто така претходно се подготвува со разделување на неколку класи, кои посебно се концентрираат.

Завршна операција. Се применува за разделување на производите од концентрацијата на неколку класи по крупност, кои понатаму се користат за различни цели. Всушност, во овој случај се контролира крупноста на концентрираниот производ, па ова класирање се нарекува и контролно.

Самостојна операција. Се јавува како основна технолошка операција за преработка на дадена минерална сировина, како и за разделување на одделни производи со различна крупност.

Главна операција. Во овој случај, минералната сировина се разделува според крупност, при што, различните класи се богати со различни компоненти и со класирањето се добиваат производи со различен минерален состав. Се користи во сите постројки за концентрација на каолин.

### 3.2 Хидраулички класификатори во центрифугално поле

Во праксата на минералното инженерство најраспространет класификатор од овој вид е **хидроциклонот**. Конструктивно тоа е сосема едноставен уред, составен од три фиксни или стабилни дела. Во средниот цилиндричен дел, тангенцијално се доведува пулпата под притисок кој може да варира од зависност од бараната крупност на раздвојување и изнесува од  $0,04$  до  $0,15$   $MRa$ . Долниот дел има форма на конус, кој завршува со уред за празнење на покрупните зрна од граничното зрно (песокот).

Горниот дел, со цилиндрична форма, служи за празнење на преливот (поситните честички од граничното зрно на класирање), кои во него се доведуваат низ централна цевка.

Процесот на класирање во хидроциклоните се остварува на следниот начин: Доведената пулпа ротира околу централната цевка и при тоа благодарейќи на различните центрифугални сили, покрупните зрна спирално се спуштаат по ободот кон долниот (излезен) дел на конусот од каде се празнат (одведуваат), а поситните честички по внатрешната спирала, низ централната цевка се издигаат во кутијата (горниот цилиндричен дел) за прелив, од каде низ отвор се одведуваат кон одредиштето.



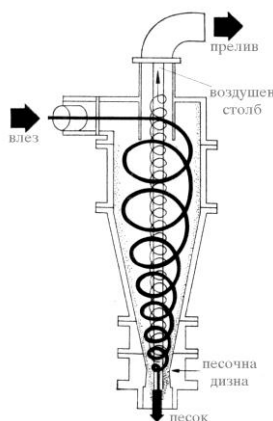
Слика 12. Хидроциклон

Во внатрешноста на хидроциклоните движењето на пулпата (суспензијата) е мошне сложена. Истовремено, поради конструктивните особености, се остварува:

- **Кружно движење**, со променлива тангенцијална брзина од ободот кон средината на хидроциклонот. Таа постепено се зголемува, за да непосредно до воздушниот столб остро се намали. Врската меѓу тангенцијалната брзина и радиусот на ротирање е:  $V_{\tau}R^n = const.$ , каде е експонентот променлив од 0,3 до 0,9, почнувајќи од ободот;
- **Радијално движење** со брзина, која од ободот кон средината се намалува постепено, за да се изедначи на нула во најдолните слоеви на самата граница со воздушниот столб, а во горните слоеви во самата течност и тоа дотолку поблиску до ободот, доколку слојот е повисок, таа

граница е повлечена со полна коса линија. Во слоевите над долниот дел на централната цевка, радијалните брзини штом ќе ја пресечат нултната линија започнуваат да растат, што потпомогнува ситните честички полесно да се одведуваат во преливната комора;

- **Вертикално движење:** во пределот од нултната линија до воздушниот столб, вертикалната брзина е насочена кон преливната цевка односно кон горниот излез. Таа е насочена кон долниот излез од другата страна на нултната линија или во пределот на нултната линија до ободот на конусниот дел на хидроциклонот. (Кога се зборува за **нултната линија**, всушност се мисли на **нултна површина**). Од *сликата 13*. се гледа дека вертикалната брзина, насочена кон долниот излез, расте од нултната површина кон ободот, како што и во внатрешната зона расте од нултната површина кон воздушниот столб;
- **Движење на воздушниот столб** по осовината (средината) на хидроциклонот. Тој се создава од увлечениот воздух од атмосферата, низ двата излезни отвори и од самата вода, поради турбулентното движење при намален притисок.



Слика 13. Шема на движење на материјалот во хидроциклон

Ако двата излезни отвори имаат ист дијаметар, воздушниот столб има цилиндрична форма, во спротивен случај тој има форма на пресечен конус, со поголема основа на страната на отворот со поголем дијаметар.

Како последица на таквото движење:

1. Во хоризонтална рамнина, покрупните честички, под истовремено дејство на центрифугалната и радијалната сила, се движат кон сидот, а поситните честички од граничното зрно, кон осовината или кон воздушниот столб на хидроциклонот;
2. Во вертикална рамнина, под дејство на гравитациската сила и вертикалното струење (во зоната до сидот, со насока кон долниот излез

или во зоната до воздушниот столб, со насока кон горниот излез), крупните честички или зрна се движат во гравитациска, а ситните во зенитна насока.

Резултантите на ова комбинирано дејство на силите, според тоа, за крупните зрна се накосени кон сидот, а за ситните кон преливниот излез *Vorteks*. Долниот излез, во терминологијата на минералното инженерство се нарекува *Apeks*.

Капацитетот на хидроциклоните зависи од: влезниот притисок на суспензијата или пулпата и пресекот на влезниот отвор, аголот под кој сидовите на конусниот дел се накосени, диаметарот на излезниот преливен отвор и друго.

### 3.3 Движење на зрната во хидроциклонот

Врз минералните зрна во хидроциклонот дејствуваат, пред се, следните сили: центрифугална сила *P* која се стреми да го усмери зрното кон ободот на хидроциклонот и сила која произлегува од радијалната компонента на движењето на флуидот и го насочува движењето на зрното кон оската на хидроциклонот.

Центрифугалната сила е еднаква на:

$$P = \frac{mV_t^2}{R} \quad (4)$$

каде што е: *m* - маса на зрното,

*V<sub>t</sub>* - тангенцијална брзина,

*R* - радиус на кружната патека,

Имајќи предвид дека  $m = G/g$ , а  $V_t = \pi n/30$ , центрифугалната сила ќе биде:

$$P = \frac{GRn^2}{900} \quad (5)$$

каде што е:

*G* - маса на зрното (*kg*),

*n* - број на завртувања во минута на зрното во хидроциклонот.

Одовде произлегува дека вредноста на центрифугалната сила е во поголема зависност од брзината на вртење отколку од радиусот на кружната патека, како и објаснувањето дека димензиите на хидроциклонот не влијаат во голема мерка врз финоќата на преливот.

Силата  $S$ , условена од радијалното движење на флуидот во хидроциклонот, движењето на зрната во хидроциклонот го насочува кон оската на хидроциклонот. Бидејќи крупноста на зрната на минералната сировина која се класира често се движи во областа на дејствување на **Stokes** - овиот закон, силата  $S$  може да се напише дека е еднаква на:

$$S = 3\pi\mu dU \quad (6)$$

каде што е:  $U$  - радијална брзина во правец на оската на хидроциклонот

$$U = \frac{Q}{a} \pi R \quad (7)$$

каде што е:

$Q$  - количество флуид во единица време,

$I$  - висина на воздушниот столб.

Ако  $U$  се замени во равенството, за силата  $S$  се добива дека е:

$$S = \frac{3\mu Qd}{2IR} \quad (8)$$

Односот помеѓу силите  $P$  и  $S$  го одредува правецот на движењето на зрната во хидроциклонот. Ако преовладува центрифугалната сила  $P$ , зрната ќе бидат одведени кон ободот на хидроциклонот а од таму низ отворот за празнење на песок. Ако пак преовладува дејството на радијалната струја на флуидот, зрното ќе се движи кон внатрешната вртложна струја и ќе се празни низ отворот за прелив.

Силата потребна за одржување на кружно движење на зрната во хидроциклонот по радиусот  $R$  еднаква е на:

$$F = \frac{\pi d^3 (\delta - \Delta)}{6} + \frac{V_t^2}{R} \quad (9)$$

Колку е помал дијаметарот на зрното  $d$  или разликата  $(\delta - \Delta)$ , зрното ќе биде поблиску до оската на хидроциклонот и поголема ќе биде веројатноста вртложната струја да го изнесе зрното од хидроциклонот низ вртложната цевка во вид на прелив.

### 3.4 Класирање во хидроциклон

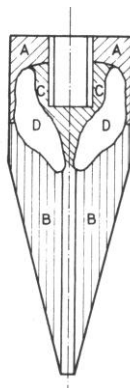
Внатрешноста на хидроциклонот може да се подели на четири области, во кои се наоѓаат зрна со различен гранулометриски состав.

- Областа (**A**) се наоѓа во непосредна близина на горниот дел - покривот на хидроциклонот и сидовите на цилиндричниот дел. Во оваа област пулпата е со идентичен гранулометриски состав како и влезната пулпа.

- Во областа (**B**) се наоѓа материјал чиј гранулометриски состав е многу сличен со гранулометрискиот состав на песокот. Оваа област зафаќа најголем дел од конусниот дел на хидроциклонот.

- Областа (**C**) ја опкружува преливната цевка и продолжува надолу долж аксијалната оска на хидроциклонот до границата со областа (**D**) и (**B**). Оваа област е тесна и ограничена. Гранулометрискиот состав во областа (**C**) е идентичен со гранулометрискиот состав на преливот од хидроциклонот.

- Областа (**D**) е со тороидален облик. Со својот горен ја дели областа (**C**) од областа (**A**), додека долниот дел е меѓу областите (**B**) и (**C**). Гранулометрискиот состав е побогат со зрна со средна крупност во однос на оној кој се наоѓа во влезниот материјал. Зрната во оваа област се распоредени радијално. Смалувањето на крупноста на материјалот е со смалувањето на радијалното растојание од аксијалната оска. Според ваквата поделба може да се каже дека областа (**A**) содржи неклассиран влезен материјал, областите (**B**) и (**C**) содржат потполно класиран песок и прелив, а областа (**D**) е делот во кој се одвива процесот на класирање. Треба да се истакне дека најголем дел од конусниот дел на хидроциклонот, областа (**B**), нема директна улога во процесот на класирање.



Слика 14. Области на класирање во хидроциклон

Процесот на раздвојување според крупност се одвива на следниот начин:

1. Влезниот материјал влегува во хидроциклонот тангенцијално под притисок, при што зрната кружно се распоредуваат во областа (**A**). Сидот на хидроциклонот, тангенцијалниот тек на влезниот материјал го менува во кружно движење и заедно со насочувачкото дејство на хидроциклонот и всмукувачкото дејство на преливната цевка доаѓа до формирање на тороидалната форма на вртлогот во областа (**D**). Ситните зрна движејќи се долж надворешниот сид на преливната цевка или од долниот дел на тороидалната зона (**D**), влегуваат во преливната цевка. Учеството на зрна од горниот аксијален дел на областа (**B**) во овој поток е минимално.

2. Крупните зрна, главно, се движат надолу проаѓајќи од областите (**A**) и (**D**) во областа (**B**). На тој начин се издвојуваат од ситните зрна, кои преоѓаат од областите (**A**) и (**D**) во областа (**C**).

3. Зрната со средна крупност го заземаат најголемиот дел од просторот во областа (**D**). Овде се акумулираат и рециркулираат сè додека не бидат одвоени под дејство на створените услови на класирање. Најчесто овие зрна преоѓаат во областа (**C**), т.е. во преливот, а еден дел поради радијалната сегрегација во областа (**D**) преоѓаат во областа (**B**), а потоа во песокот.

4. Во хидроциклонот најдолго време се задржуваат зрната кои се малку покрупни од  $d_{50}$  и кои после циркулацијата во областа (**D**), најчесто преоѓаат во конусниот простор (**B**). Зрната пак со крупност  $d_{50}$  и малку поситни од  $d_{50}$  најчесто преоѓаат од областа (**D**) во областа (**C**) и го напуштаат хидроциклонот низ преливната цевка многу побргу од зрната кои преминале во областа (**B**).

Како резултат на применетите работни услови и избраните конструктивни особини на хидроциклонот, може да дојде до лошо класирање на сировината. Така, на пример, зголемената густина на влезната пулпа доведува до смалување на областа (**D**). При недоволна аксијална должина на хидроциклонот или ако аголот на конусниот дел е поголем, доаѓа до издолжување на областа (**D**) до толку што со својот долен дел проаѓа низ отворот за песок. Ако волуменскиот проток е мал во однос на волуменот на хидроциклонот, се зголемува областа (**D**), но се намалува ефикасноста на класирање.



### **3.5 Основни показатели на работата на хидроциклонот како класификатор**

Основни показатели на работата на хидроциклоните се капацитетот на хидроциклонот, гранулометрискиот состав и содржината на цврсто во производите на класирањето, и ефикасноста на класирањето.

#### **3.5.1 Капацитет на хидроциклонот**

Со бројни испитувања било покажано дека при постојана густина на пулпа и постојан гранулометриски состав, капацитетот на хидроциклонот се менува пропорционално со квадратниот корен од вредноста на работниот притисок:

$$Q = k\sqrt{P} \quad (10)$$

Исто така било покажано дека зависноста помеѓу капацитетот и дијаметарот на преливната цевка при постојан притисок се потчинува на равенството:

$$Q = kd_{pr} \quad (11)$$

Ако дијаметарот на преливната цевка е значително поголем од дијаметарот на отворот за песок, што обично се јавува во индустриски услови, промената на дијаметарот на отворот за песок покажува незначително влијание врз пропусната способност на хидроциклонот.

*Linch* и *Rao* (1975) [24], како и *Linch* и др. (1974 и 1975 год.) [25], при постојана крупност на влезната суровина ја добиле следната регресиона равенка:

$$Q = kd_{pr}^{0.73} d_v^{0.86} P^{0.42} \quad (12)$$

При поголеми промени во гранулометрискиот состав на влезната суровина, се применува следната регресиона равенка:

$$Q = kd_{pr}^{0.68} d_v^{0.85} d_p^{0.49} \beta_{-53}^{-0.35} \quad (13)$$

каде што е:  $\beta_{-53}$  - учество на класата **-53  $\mu\text{m}$ , %**.

Статистичката анализа на расположливите податоци покажала дека зависноста на капацитетот на хидроциклоните од основните параметри, при постојана вредност на останатите, е следна:

- линеарно се зголемува со зголемувањето на ***IgP***, што е во согласност со поранешните истражувања;

- нелинеарно се зголемува со зголемувањето на дијаметарот на отворот за прелив. Сите поранешни истражувања укажуваа на линеарна зависност меѓу капацитетот и дијаметарот на вртложната цевка, додека современите анализи покажале дека постојат извесни отстапувања од допуштените.

- линеарно расте при не многу големи зголемувања на дијаметарот на отворот за песок;

- со зголемувањето на густината на пулпата во влезот, во почетокот расте до некоја вредност, а потоа следува линеарно опаѓање.

При различни истражувања се појавуваат разидувања за релативното влијание на содржината на цврсто во влезот. Некои истражувачи утврдиле дека зголемувањето на густината доведува до зголемување на капацитетот при постојан притисок, други пак забележале обратен ефект. За разрешување на таа противречност ***Linch, Rao (1975)*** и соработниците извршиле серија опити на хидроциклони со различни димензии и различни технолошки услови, при што се покажало дека во нормални технолошки услови, капацитетот на хидроциклоните при работа со пулпа е повисок отколку при работа со вода. Тоа делумно го објаснува укажувањето на позитивното влијание на зголемената содржина на цврсто врз капацитетот на хидроциклонот. Со понатамошно зголемување на содржината на цврсто, капацитетот опаѓа.

Во последните години во техничката литература се појавени голем број формули за пресметување на капацитетот на хидроциклони. Големiot број разнообразни формули ја отежнуваат практичната пресметка и изборот на хидроциклоните. Најчесто применувана формула, која поаѓа од *Бернулиевата p-ка*, е формулата на ***Поваров*** и ***Щербаков***:

$$Q = 15.5 k_D k_\alpha d_v d_{pr} \sqrt{P} \quad (14)$$

каде што е:

***k<sub>D</sub>*** - коефициент кој зависи од дијаметарот ***D*** на хидроциклонот,

$$k_D = 0.8 + \frac{1.2}{1 + 0.1D} \quad (15)$$

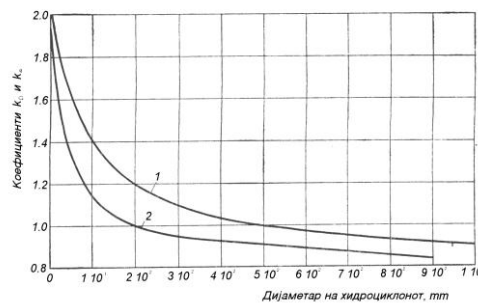
$k_\alpha$  - коефициент кој зависи од аголот на конусност, за  $\alpha=20^\circ$ ;  $k_\alpha = 1$ .

$$k_\alpha = 0.79 + \frac{0.044}{0.0379 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (16)$$

$d_v$  - дијаметар на влезна цевка [cm],

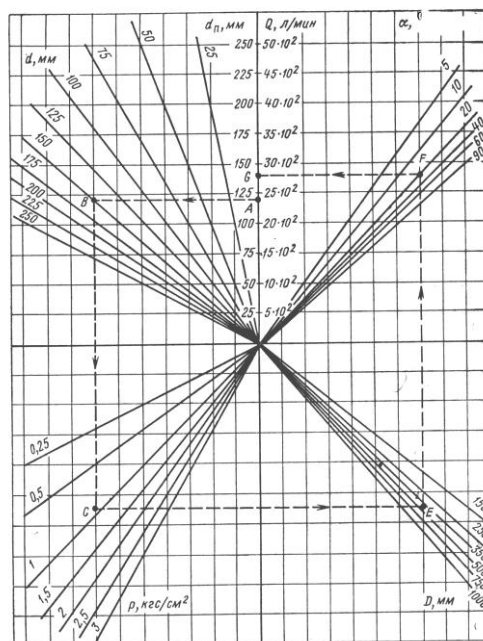
$d_{pr}$  - дијаметар на преливна цевка [cm],

$P$  - притисок под кој се внесува пулпата во хидроциклонот [MPa]



Слика 15. Промена на коефициентите  $k_\alpha$  (1) и  $k_D$  (2) во зависност од дијаметарот на хидроциклонот

За полесно пресметување е дадена зависноста на коефициентите  $k_\alpha$  и  $k_D$  од дијаметарот на хидроциклонот, а на следната слика даден е номограм за пресметување на капацитетот на хидроциклонот според горната ф-ла (Поваров) [33].



Слика 16. Номограм за определување капацитетот на хидроциклон

### 3.5.2 Гранична крупност на класирање

При класирање на материјал во хидроциклон, еден од основните показатели на работата на хидроциклонот е граничната крупност на класирање. Под гранична крупност на класирање се подразбира крупноста на зрната кои имаат подеднаква шанса да преминат во песокот и преливот, т.е 50% се распоредуваат во песокот, а 50% во преливот на хидроциклонот. Резултатите од истражувањата и резултатите од пракса покажуваат дека при работа во индустриски услови крупноста на граничното зрно е обратно пропорционална од квадратниот корен на односот помеѓу отворите за празнење и право пропорционална од квадратниот корен на содржината на цврсто во влезната пулпа. Постојат голем број формули за определување на крупноста на граничното зрно. Дел од нив, кои се добиени врз основа на теоретските претпоставки, вклучуваат променливи кои зависат од режимот на движењето на течноста во хидроциклонот или други величини, што од своја страна ја усложнуваат функцијата од влезните параметри. Поради тоа за добивање на поедноставни пресметковни формули, авторите биле принудени да ги користат експерименталните резултати. Малата точност на формулите за пресметување на граничната крупност на класирање, се должи на тоа што, земањето во предвид на карактеристиката на крупност и материјалниот состав на преработуваната суровина, практично е невозможно. Најточни резултати (средно квадратно отстапување - 37%) дава формулата:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{D d_{pr} c}{d_p k_D \sqrt{P} (\rho - \rho_0)}} \quad (17)$$

каде што е:

$d_{50}$  - крупност на гранично зрно, ( $\mu m$ )

$D$  - дијаметар на хидроциклонот, ( $cm$ )

$d_{pr}$  - дијаметар на преливна цевка, ( $cm$ )

$c$  - масено учество на цврсто во влезната пулпа, (%)

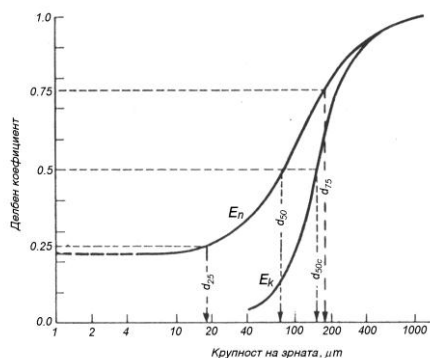
$d_p$  - дијаметар на отвор за песок, ( $cm$ )

$P$  - притисок на влезот во хидроциклонот, ( $MPa$ )

$\delta$  - густина на цврстата фаза, ( $t/m^3$ )

$\delta_0$  - густина на течната фаза, ( $t/m^3$ )

Во пракса, најчесто применуван начин за дефинирање на граничната крупност на класирање и споредување на ефикасноста на класирање е *делбената крива*. Тоа е графички приказ на делбениот број во однос на големината на зрната, каде што делбениот број е веројатноста зрно со дадена крупност да биде одвоено во еден од производите на класирање. Со други зборови кажано, делбениот број претставува бројчен однос помеѓу масеното учество на дадена класа во песокот или преливот и учеството на таа класа во влезот. Граничната крупност на класирање се добива на апсцисната оска во точка која на делбената крива и одговара вредност на ординатната оска 50. Ваквото дефинирање на  $d_{50}$ , предложено од **F. W. Mayer [21]**, е аналогно со предлогот на **K. F. Tromp [21]** за одредување на густината на раслојување во процесите на гравитациска концентрација.



Слика 17. Нормална  $E_n$  и коригирана  $E_k$  поделбена крива

### 3.5.3 Ефикасност на класирање

Под ефикасност на класирање се подразбира односот меѓу прирастот на количеството материјал со одредена крупност (според која се вршат пресметките) во преливот и прирастот на количеството материјал со истата крупност во преливот при идеално класирање.

Определувањето на ефикасноста на класирање се врши според следната формула (формула на **Ханкок, Лу кен, Дин**) [21]:

$$E_{-d} = \frac{(\alpha - \gamma)(\beta - \alpha)}{\alpha(100 - \alpha)(\beta - \gamma)} \cdot 100 \quad (18)$$

каде што е:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  - содржина на соодветната класа во влезот, преливот и песокот.

Треба да се забележи дека под терминот “ефикасност на класирање” неправилно е да се подразбира извлекувањето на дадената “-” класа во преливот. Често во литературата, за класификатори кои даваат два производа, ефикасноста на класирање се пресметува по поправа формула:

$$E_{-d} = \frac{\beta(\alpha - \gamma)}{\alpha(\beta - \gamma)} \cdot 100 \quad (19)$$

меѓутоа оваа формула дава добри резултати само кога е обезбедена совршена хомогенизација на суровината и совршено раздвојување во хидроциклонот, без појавата еден дел од влезната суровина директно да отиде во прелив, без класирање. За разлика од неа, според претходната формула, дозволено е еден дел од влезната суровина без класирање да отиде во преливот.

### **3.6 Влијание на променливите параметри врз технолошките показатели на хидроциклонот**

Сите променливи параметри кои влијаат врз показателите на работа на хидроциклонот, може да се поделат на две групи - **конструктивни и технолошки**.

Првата група ја сочинуваат геометриските променливи на хидроциклонот, главно, дијаметарот на хидроциклонот, дијаметарот на влезниот отвор, на отворите за прелив и песок, аголот на конусот, должината на хидроциклонот, односот на цилиндричниот и конусниот дел.

Втората група ја сочинуваат: притисокот на влезот во хидроциклонот и капацитетот, густината на влезната пулпа, карактеристиките на крупност на цврстата фаза, минералниот состав и густината на цврстата фаза и др.

#### **3.6.1 Дијаметар на хидроциклонот**

Со зголемувањето на дијаметарот на хидроциклонот расте неговиот капацитет и крупноста на разделување.

Теоретски совршено е јасно дека центрифугалната сила, расте со смалувањето на дијаметарот на хидроциклонот. Така со хидроциклоните со мал дијаметар може да се добие пофин прелив, коешто не е можно со хидроциклони со поголеми дијаметри. Во постројките со мал капацитет и во кои се обработуваат финозрнести суровини или суровини со мала густина (пр. производство на скроб, шеќер, лак и др.), се применуваат батерии од мултициклони, составени од хидро-циклони со дијаметар

10 ÷ 75 mm, кои овозможуваат добивање на прелив со крупност до 10  $\mu m$ . Постројките за подготовка на минерални сировини, каде што е потребен поголем капацитет и добивање покрупен прелив, применуваат хидроциклони со поголем дијаметар, а за добивање пофин прелив, хидроциклони со помали димензии. Во последните години се наметнува тенденција за заменување на хидроциклоните со мал дијаметар со циклони со поголеми дијаметри. Анализите од пракса покажуваат дека, влијанието на дијаметарот на хидроциклонот, врз резултатите на класирањето е помало отколку влијанието на големините на отворите за празнење и густината на пулпата. За добивање прелив со еднаква крупност во хидроциклони со поголем дијаметар, потребно е густината на влезната пулпа да биде помала, а односот на отворите за празнење поголем отколку кај хидроциклони со помал дијаметар. Притисокот на влезот потребно е да биде повисок отколку кај хидроциклоните со помал дијаметар.

### 3.6.2 Големина на влезниот отвор

Влезната цевка најчесто има правоаголен напречен пресек. Големината на влезната цевка се изразува преку еквивалентен дијаметар  $d_v$ , кој е еднаков на дијаметарот на кругот со иста површина како површината на правоаголниот пресек на влезната цевка:

$$d_v = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}} \quad (20)$$

каде што се:  $a$  и  $b$  - димензии на правоаголниот пресек на цевката, најчесто  $b = 2a$ .

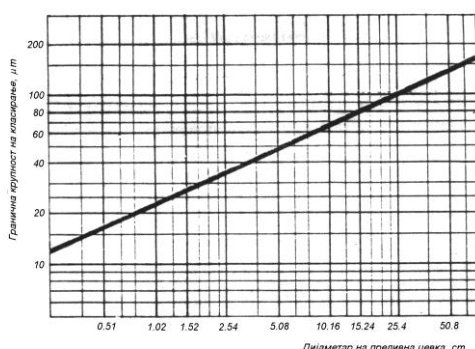
Промената на големината на влезниот отвор значително влијае врз капацитетот на хидроциклонот, но незначително на квалитетот на работата на хидроциклонот, што е потврдено и во пракса. Оптималниот дијаметар на влезниот отвор  $d_v$  за индустриски хидроциклони е  $0.15 D \div 0.25 D$ .

### 3.6.3 Дијаметар на преливна цевка

Промената на дијаметарот на преливната цевка влијае на сите показатели на работата на хидроциклонот. Неговото зголемување во определени граници, при постојан притисок на влезот, предизвикува право пропорционално зголемување на капацитетот. Отстапувањето од овие закономерности настапува ако се зголеми односот на дијаметарот на преливната цевка и влезниот отвор ( $d_{pr} > 2.5 \div 3 d_v$ ).

Дијаметарот на преливната цевка се движи во границите од  $D/8$  до  $D/2,3$ , а оптималниот дијаметар за индустриски хидроциклони  $d_{pr}=0.2D\div0.3D$ . Во однос на влезниот отвор тој треба да е нешто поголем т.е. од  $d_{pr}=d_v$  до  $d_{pr} = 2d_v$ . За создавање на еднаква средна брзина на течноста во преливниот и влезниот отвор целесообразно е да се примени  $d_v = 0.8d_{pr}$ .

Зависноста на крупноста на класирањето  $d_{50}$  од дијаметарот на преливната цевка (за долунаведените услови) е прикажана на следната слика.



Слика 18. Гранична крупност на класирање во функција од дијаметарот на преливната цевка

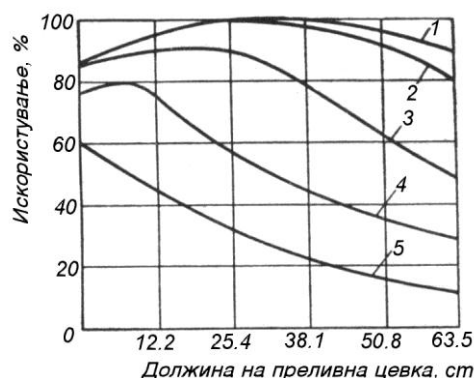
### 3.6.4 Должина на вртложна цевка

Кај првите хидроциклони [12], преливот се празнел низ отвор во центарот на горниот дел од цилиндричниот дел, т.е. вртложната цевка не продирала во внатрешноста на цилиндричниот дел. Тоа доведувало до зголемување на количеството на крупни зрна во преливот. За да се спречи директното преоѓање, без класирање, на крупните зрна во преливот, конструктивно е вградена вртложна цевка од горниот дел на хидроциклонот до извесна длабочина во цилиндричниот дел. Длабочината на заронетост на вртложната цевка во хидроциклонот е од  $D$  до  $D/6$  (средно  $D/2\div D/3$ ), така што нејзиниот долен дел не ја достигнува основата на конусниот дел, но е заронета под нивото на влезната пулпа.

Со продолжувањето на вртложната цевка се скратува природната струја на вртлогот, а со тоа се смалува и можноста да се издвојат ситните зрна од него. Тоа доведува до зголемување на граничната крупност на класирање.



Влијанието на длабочината на заронетост на преливната цевка врз извлекувањето на зрна со различна крупност во преливот е прикажано на следната слика.



Слика 19. Влијание на длабочината на преливната цевка

врз извлекувањето на уски класи во песокот

Прикажаните резултати се однесуваат за следните работни услови: ( $D=38mm$ ;  $d_v=5.5mm$ ;  $d_{pr}=7.6mm$ ;  $d_p=3.8mm$ ;  $\alpha=20^\circ$ ); 1 -  $0.048mm$ ; 2 -  $0.0375mm$ ; 3 -  $0.028mm$ ; 4 -  $0.0205mm$ ; 5 -  $0.0155mm$ .

Дебелината на сидот на преливната цевка и нејзината форма не влијаат врз показателите на работата на хидроциклонот и се избираат од конструктивни причини.

### 3.6.5 Дијаметар на отвор за песок

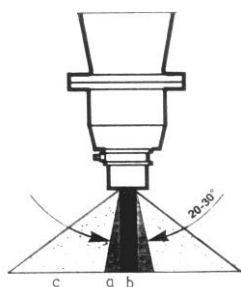
Промената на дијаметарот на отворот за песок, при работа на хидроциклон во отворен циклус малку влијае врз капацитетот на хидроциклонот. При работа во затворен циклус со мелница, кога песокот проаѓа низ мелницата и пак се враќа во хидроциклонот, влијанието на дијаметарот на песочниот отвор врз капацитетот може да биде суштествено. Со смалувањето на песочниот отвор се забележуваат следните закономерности:

- до некој предел се зголемува содржината на цврсто во песокот; содржината на цврсто зависи од неговата крупност и густина. За материјал со голема густина и крупност, содржината на цврсто во песокот може да достигне **80-85%**. Натамошното смалување на дијаметарот на отворот за песок не предизвикува промена на содржината на цврсто во песокот. При уште помали дијаметри песочниот отвор се забива со песок;

- се зголемува крупноста на преливот;
- се зголемува учеството на преливот и соодветно се намалува учеството на песокот;
- се зголемува до максимум, а потоа опаѓа ефикасноста на класирање.

Доколку дијаметарот на отворот за песок го надмине дијаметарот на отворот за прелив, работата на хидроциклонот се нарушува и целиот материјал се празни низ отворот за песок. Дијаметарот на отворот за песок се избира експериментално, во зависност од бараните показатели на работата на хидроциклонот.

Обликот на излезниот млаз низ отворот за песок, може да послужи за визуелна проценка на ефикасноста на работата на хидроциклонот. Прикажани се три можности за изгледот на излезниот млаз песок, во зависност од одбраните големини на песочниот отвор.



Слика 20. Облик на излезниот млаз песок

*a- добро димензиониран отвор*

*b- поддимензиониран отвор*

*c- предимензиониран отвор*

Во индустриските постројки се применуваат хидроциклони со различни типови на отвори за песок, со можност за подесување на неговата големина, бидејќи не е можно однапред да се предвиди оптималната големина. На тој начин тој се подесува во текот на работата со промена на диза, пнеуматско подесување на гумена диза, механичко стеснување на гумена диза или гумена диза со повеќе диска.

### 3.6.6 Однос на дијаметрите на отворите за празнење

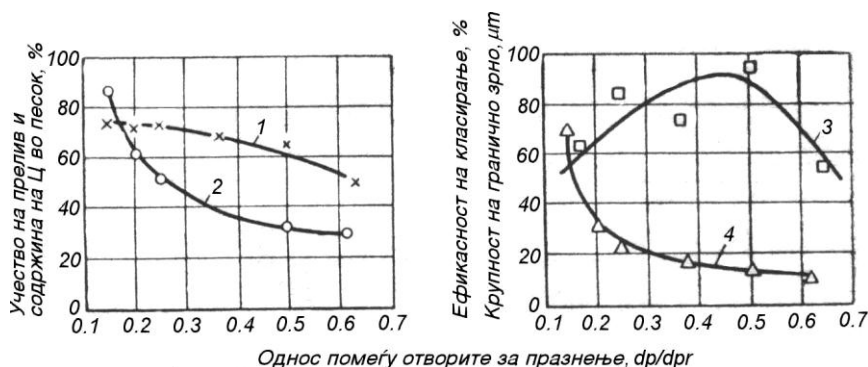
Односот на дијаметрите на отворите за празнење (однос меѓу дијаметарот на отворот за песок и дијаметарот на отворот за прелив,  $d_p/d_{pr}$ ), се јавува како важен геометриски параметар при работата на индустриските хидроциклони.

Промената на овој однос суштествено влијае врз сите показатели на работата на хидроциклоните, а пред сè врз прераспределбата на обемот на песокот и преливот. Со зголемувањето на овој однос, количеството на издвоениот песок расте, а количеството на преливот и содржината на цврсто во песокот се намалува. Истовремено крупноста на цврстата фаза во преливот опаѓа само до определен предел. Со понатамошно зголемување на овој однос, се намалува ефикасноста на класирање, песокот се разводнува и се онечистува со фина фракција.

Односот меѓу дијаметарот на песочниот и преливниот отвор се колеба во границите од 0.15 до 1.

Промената на содржината на цврсто во песокот, масеното учество на преливот, ефикасноста на класирањето и крупноста на граничното зрно во зависност од промената на  $d_p/d_{pr}$  е иста како и во зависноста при промената на отворот за песок.

Неопходно е да се спомене дека при промена на гранулометрискиот состав и густината на влезната суровина, при еден ист однос на дијаметрите, показателите на работата на хидроциклонот се менуваат.



Слика 21. Зависност на показателите на работата  
на хидроциклонот од односот помеѓу отворите за празнење  
1 - содржина на цврсто во песокот; 2 - учество на прелив;

### **3.6.7 Агол на конусност**

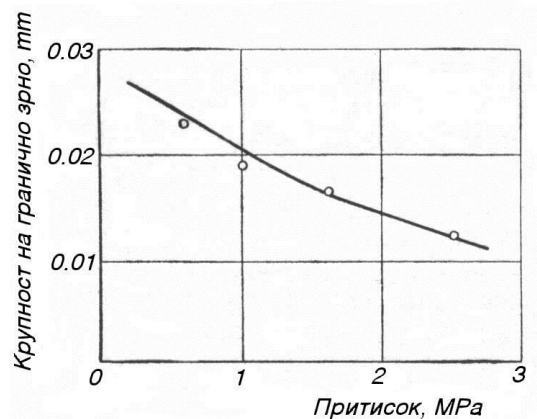
Практичните искуства покажуваат дека за индустриски хидроциклони, кои работат како апарати за класирање, оптималниот агол на конусност е околу  $20^\circ$ . Од друга страна пак, при работа со ретки пулпи и при обработка на материјал со мала густина и добивање фини преливи, се применуваат хидроциклони со агол на конусност  $5^\circ$ .

При работа со релативно густы и грубозрнести пулпи и при потреба од добивање мало учество на песок, не може да се применуваат хидроциклони со агол на конусност  $20^\circ$ , ако тоа бара примена на мал песочен отвор. Во такви случаи треба да се применуваат хидроциклони со агол на конусност поголем од  $40^\circ$ . Поради тоа концентрацијата во тешки суспензии, како и концентрацијата на златоносни руди се врши во хидроциклони со агол на конусност  $40^\circ \div 120^\circ$ .

### **3.6.8 Притисок на влезот**

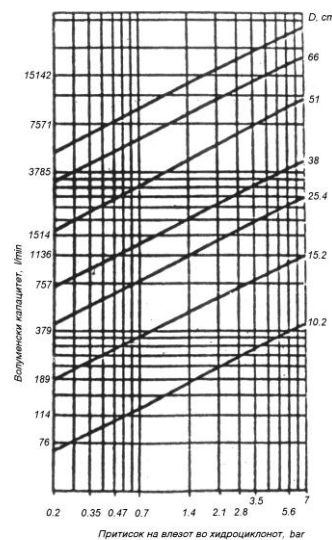
Притисокот на влезот, при зададен волуменски капацитет, зависи главно од дијаметарот на преливната цевка и влезниот отвор. За добивање на крупни преливи, дозволена е работа при понизок притисок на влезот (пр. до **0.3 bar**). За добивање пак на пофини преливи притисокот на влезот треба да се оддржува повисок (**1.5÷2 bar**). Влијанието на притисокот врз показателите на работата на хидроциклонот е поизразено при работа со финозрнести и ретки пулпи. За добивање на задоволителни резултати од класирањето, мошне важно е притисокот да се одржува на постојано ниво. Секое колебање ја намалува ефикасноста на класирање, особено за сметка на квалитетот на песокот, тој при остри колебања на притисокот со текот на времето по својот состав се приближува кон составот на влезната пулпа. Во пракса, колку е понизок притисокот, како правило, толку е поголемо неговото релативно колебање.

На *сл.22* прикажана е промената на крупноста на граничното зрно во зависност од притисокот на влезот во хидроциклонот.



Слика 22. Промена на крупноста на граничното зрно во зависност од притисокот на влезот во хидроциклонот

Во литературата многу малку внимание е посветено на проучувањето на врската меѓу влезниот притисок и количеството пулпа кое влегува во хидроциклонот. Оваа врска е значајна, бидејќи го дефинира протокот на пулпа под режимот под кој работи хидроциклонот. Во пракса оваа зависност го овозможува правилниот избор на пумпата во зависност од потребите кои се поставуваат пред пумпата. Притисокот на влезот во хидроциклонот покасно може да се употреби како индикатор на протокот на пулпа, кој претставува важен параметар кој не се менува во текот на процесот на класирање. Прикажана е зависноста на протокот пулпа од влезниот притисок ( **Деушиќ**) [8].



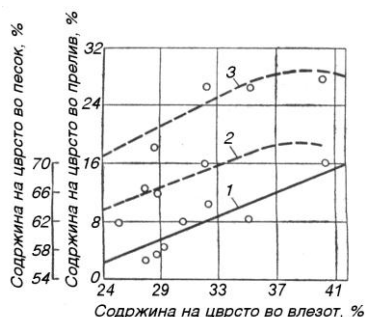
Слика 23. Проток на пулпа низ хидроциклони со различни дијаметри во функција од влезниот притисок

### 3.6.9 Густина на влезната пулпа

Со зголемувањето на содржината на цврсто во влезната пулпа, се зголемува густината на пулпата во хидроциклонот, што доведува до смалување на брзината на радијалното движење на цврстите честици. Во врвот на конусниот дел на хидроциклонот, близу отворот за песок, се формира повисока и густа постела од крупните зрна на цврстата фаза од пулпата.

Секое колебање на густината на пулпата предизвикува промена на содржината на цврсто во песокот и преливот, промена на крупноста на преливот и онечистување на песокот со фина фракција. Крупноста на преливот се зголемува со зголемувањето на густината на влезната пулпа не само кога дел од песокот оди во преливот, туку и при зголемување на вискозитетот и густината на пулпата. На сликата е прикажана промената на показателите на класирањето во зависност од содржината на цврсто во влезот во индустриски хидроциклон.

Разделувањето на материјалот по крупност во хидроциклонот се врши само до определен предел на густина на пулпата. Ако содржината на цврсто е 70%, процесот на класирање се нарушува и практично се заменува со процес на скратување на пулпата на два производа еднакви по крупност и густина.

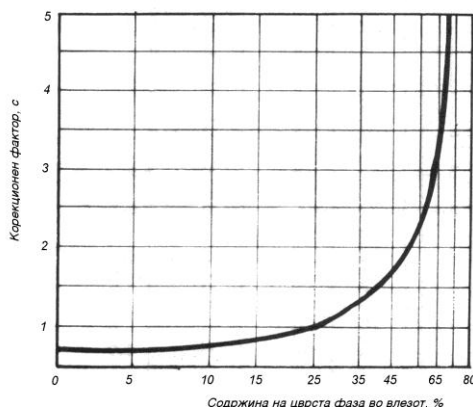


Слика 24. Промена на показателите на класирање во зависност од  
густината на пулпата:

1 - содржина на класата -0.044mm во преливот;

2 - содржина на цврсто во песокот;

3 - содржина на цврсто во преливот.



Слика 25. Корекционен фактор "с" за граничната крупност

на класирање во функција од содржината на цврсто во влезната пулпа

Често пати, во постројките каде што е присутен затворен круг на мелење и класирање, од хидроциклоните се бара погрубо класирање од она што е дадено од производителот на хидроциклонот. Тоа може да се постигне со погуста пулпа. Преку дијаграмот на произведувачите на хидроциклоните **Krebs [41]** и корекциониот фактор "с", се добива содржината на цврсто во влезната пулпа, за зголемена крупност на класирање. Корекциониот фактор "с" се добива како однос помеѓу бараната крупност на класирање и првобитната крупност на класирање. За добиената вредност на "с" со пресекот на кривата, на апсцисната оска се добива новата вредност на содржина на цврстата фаза во влезната пулпа.

### **3.6.10 Гранулометриски состав на цврстата фаза во влезната пулпа**

При работа на хидроциклоните со крупнозрнеста сировина, содржината на цврсто во песокот е поголема, а крупноста на преливот покрупна, отколку при работа на хидроциклонот со ситнозрнеста пулпа, при исти останати услови на работа. Тоа пред сè е поврзано со фактот што, количеството материјал кој се празни низ отворот за песок при крупнозрнеста пулпа е поголемо, па следствено и отпорот кој се јавува при празнењето е исто така поголем. При тоа отворот за песок не може да го прими целиот песок и дел од него оди во преливот. Но ако се зголеми дијаметарот на отворот за песок и се добие песок со невисока содржина на цврсто, тогаш при работа со крупнозрнеста пулпа цврстата фаза во преливот ќе биде покрупна отколку при работа

на ситнозрнеста пулпа, како резултат на внесувањето на дел од крупните зрна во поткровниот и внатрешниот поток.

За материјали за кои е неопходно добивање фин прелив, се оди кон воведување на двојно хидроциклонирање. Најпрво со класирањето се добива крупен густ песок и прелив со поголемо количество крупни честици, а потоа се врши пречистување (второ класирање) на преливот или се применува шема на класирање со циркулациски прелив.

### 3.7 Острина на класификација

За разлика од сеењето, кај класификацијата не постои јасно дефинирана поделба по крупност на суровината. Тоа ја отежнува оценката за квалитетот на разделување при процесот на класификација.

Квалитетот или остријата на класификација се оценува со помош на **поделбени** или **Тромнови криви**, што претставува графички приказ на поединечното искористување на блиски по крупност класи во песокот или преливот. Вообичаено е поделбената крива да се конструира за песок. Таа крива и параметрите дефинирани на база на неа претставуваат мерка за оценка на остријата на класификација.

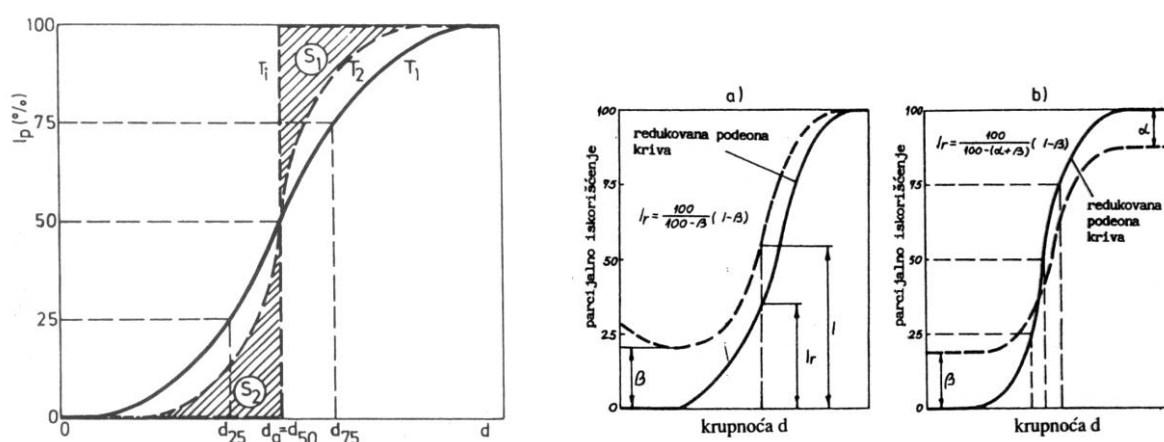
Крупноста на разделување при класификација условно се изразува преку крупноста на граничното зрно ( $d_g$ ). На крупноста на граничното зрно одговара поединечното искористување  $I_p=50\%$  поделбената крива. Имено, граничните зрна имаат подеднаква веројатност за преминат во песок или прелив.

Остријата на класификација се оценува со помош на веројатното отстапување - *E<sub>kart probable</sub> (E<sub>p</sub>)*:

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2}, [mm] \quad (21)$$

каде што се:  $d_{75}, d_{25}$ - крупност назрната за кои одговара поединечното искористување  $I_p$  (%) од 75% и 25%.





Слика 26. Острина на класификација - делбени криви и аномалии на делбените криви (десно)

Поделбената крива ( $T_i$ ) одговара на идеалната класификација кај која е  $E_p=0$ , додека поделбената крива ( $T_2$ ) одговара на поголема острина на класификација во однос на поделбената крива ( $T_1$ ) бидејќи се  $E_{p(2)} < E_{p(1)}$ .

Површината ( $S_1$ ) е пропорционална на масата на ситните зрна кои залутале (отишле) во песокот, а површината ( $S_2$ ) е пропорционална на масата на крупните зрна кои залутале (отишле) во преливот.

Меѓусебната споредба на квалитетот на работење на различни класификатори се врши со помош на **имперфекција-грешка на класификација ( $I$ )** :

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}, [mm] \quad (22)$$

При идеална класификација е  $I=0$ .

Во општ случај, ефикасноста и острината на класификација се подобри ако се помали специфичните оптеретувања на класификаторот, ако е поголемо разрежувањето на пулпата во влезот на класификаторот и ако е помало учеството на зрната со крупност блиска до граничното зрно.

За регуларна или нормална поделбена крива ја сметаме таа крива која со растечки тренд преминува од  $I=0\%$ , од долната страна на графикот и завршува на горната страна од графикот со големина од  $I=100\%$ .

Поделбените криви за класификатор многу често отстапуваат од наведениот услов за регуларност. Тоа отстапување го нарекуваме **аномалија на поделбените криви**. При класификација во струја на флуид, особено при класификација во хидроциклони, типична е аномалијата на поделбената крива дадена на *сликата 26* (десно) со позитивен почеток на кривата од ординатата оска ( $\beta$ ). При тоа, долниот крај на поделбената крива може да има константна големина ( $\beta=const.$ ), асимптотски

се приближува кон таа големина или да има точка на минимум со превиткување на кривата нагоре во областа на најситните зрна. Појавата на аномалија ( $\beta$ ) е последица на прекилот на дејствување на хидроциклонот како класификатор во областа на ситните зрна. Зрната со крупност помала од некоја големина ( $d$ ) не подлегнува на класификација во хидроциклонот туку како конституент на стабилна суспензија во течната фаза се делат во ист волуменски однос како и течната фаза во производите на класификација. Според тоа, големината ( $\beta$ ) е еднаква на уделот на вода кој преминува со песокот на хидроциклонот. Поделбените криви со аномалии ( $\alpha$ ) и ( $\beta$ ) настануваат кај неправилно одбраниот однос на дијаметар на отворите за прелив и песок или пак при појава на заглавување на хидроциклонот. Во тој случај, еден дел од некласираниот влезен материјал може да отиде во прелив, а вториот во песок.

Поделбените криви со аномалии ( $\alpha$ ) и ( $\beta$ ) не можат да се користат за оценка на острината на класификација, ако предварително не се изврши нивно **редуцирање**. Редуцирањето на поделбените криви се врши преку пресметковен пат, на тој начин што се врши корекција на големините на поединечното искористување на блиските класи по крупност и на база на новодобиените редуцирани големини се цртаат поделбените криви. Пресметката на редуцирани големини на поединечното искористување се врши преку релацијата:

$$I_r = \frac{100}{100 - (\alpha + \beta)} \times (I_p - \beta) \quad (23)$$

Начинот на дефинирање на показателите за острината на класификација од редуцираните поделбени криви е ист како и кај одредувањето на тие показатели од нормалните поделбени криви.

### **3.8 Фактори кои влијаат на хидроциклонска изведба**

Ефектите од промените на работните и проектните параметри во хидроциклоните се многу комплексни поради тоа што сите параметри се во меѓусебна зависност. Скорото е невозможно да се избере хидроциклон кој ќе го даде бараното прецизно разделување или сепарација, па затоа скоро секогаш е потребно подесување на влезните параметри, отворите на вортексот, отворите на апексот и притисокот на пулпата, или пак подесување на разредувањето на пулпата. Сепак, проектантите или дизајнерите се обидуваат да ја специфицираат хидроциклонската спремност за работа со барани големини и вредности, со пропишување за подесување на соодветни големини на отворите на влезот, преливот и песокот.

Постојат голем број на емпириски равенки кои се користат од страна на дизајнерите за предвидување на изведбата и дизајнирање на хидроциклоните.

**Bradley [4]** опишува осум различни равенки за пресметка на граничното зрно  $d_{50}$ . Сепак една од најстарите е равенката на **Dahlstrom [7]**:

$$d_{50} = \frac{13.7(D_o D_i)^{0.68}}{Q^{0.53}(S - L)^{0.5}} \quad (24)$$

Каде што  $d_{50}$  е дијаметар на граничното зрно ( $\mu m$ ),  $D_o$  е отворот на преливната цевка (cm),  $D_i$  е дијаметар на влезот од хидроциклонот (cm),  $Q$  е вкупната количина на пулпа ( $m^3/h$ ),  $S$ ,  $L$  специфична маса на цврстата материја, односно специфичната густина на течноста.

Меѓутоа, такви равенки не се директно применливи во рангот на индустриски хидроциклони, бидејќи повеќето се изведуваат да работат во разредени пулпи, користејќи при тоа многу мали дијаметри на хидроциклони.

**Plitt [32]** развил математички модел кој кој дава соодветни предвидувања за изведбата за хидроциклони со голем дијаметар, работејќи со високи содржини на цврста материја, преку широк ранг на оперативни услови. Моделот бил успешно применет за развој на автоматски контролирани системи во циклусот на уситнување во рудници во Австралија. Четири фундаментални параметри биле одредени во смисол на работни и проектни променливи, како што се гранична големина на зрното, разделување на протокот помеѓу преливот и песокот на хидроциклонот, острина на сепарација или раздвојување и капацитетот во зависност од падот на притисок низ хидроциклонот. Создадениот модел овозможува комплетна изведба на хидроциклонот преку пресметка при соодветна тошност без потребните експериментални податоци.

Равенката за дијаметар на гранично зрно  $d_{50}$  е:

$$d_{50(c)} = \frac{14.8 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063V)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (S - L)^{0.5}}, \quad (25)$$

Каде што се:  $d_{50(c)}$ , е коригирана вредност за  $d_{50}$  ( $\mu m$ );  $D_c$ ,  $D_i$ ,  $D_o$ ,  $D_u$  се внатрешен дијаметар на хидроциклонот, влезот, отворот на вортекс и отворот на апекс, изразени во (cm),  $V$  е запремински % на цврсти честички во влезот;  $h$  е растојание од дното на отворот на вортексот до врвот од преливниот отвор (cm);  $Q$  е вкупната количина на пулпа ( $m^3/h$ ),  $S$ ,  $L$  специфична маса на цврстата материја, односно специфичната густина на течноста ( $g/cm^3$ ).

Равенката за вкупната количина на пулпа ( $m^3/h$ ) во хидроциклонот е:

$$Q = \frac{0.021P^{0.56}D_c^{0.21}D_i^{0.53}h^{0.16}(D_u^2 + D_o^2)^{0.49}}{\exp(0.0031V)} \quad (26)$$

Каде  $P$  е пад на притисокот низ хидроциклонот во  $kPa$  ( $1 \text{ psi} = 6.895 \text{ kPa}$ ).

За прелиминарни дизајнерски цели, **Mular&Jull [30]**, ги развиле изразите, од резултатите добиени на **Krebs** хидроциклоните, а се однесуваат за  $d_{50}$  ( $\mu m$ ) од оперативните променливи за “типични” хидроциклони, со различни внатрешни диаметри. Овие хидроциклони имаат влезна површина во хидроциклонот за 7% од површината на пресекот во влезниот простор, а отворот на вортексот 35-40% од дијаметарот на хидроциклонот, односно дијаметарот на апексот нормално не помал од 25% од отворот на вортекс дијаметарот.

Равенката за дијаметар на гранично зрно  $d_{50}$  е:

$$d_{50(c)} = \frac{0.77D_c^{1.875}\exp(-0.301 + 0.0945V - 0.00356V^2 + 0.0000684V^3)}{Q^{0.6}(S - 1)^{0.5}} \quad (27)$$

Максималната запремина на пулпата со која може да работи хидроциклонот изнесува:

$$Q = 9.4 \cdot 10^{-3} \sqrt{P} D_c^2, \quad m^2 h^{-1} \quad (28)$$

Равенките како овие се користеле за компјутерска контрола на мелничките циклуси за да се докаже дијаметарот на граничното зрно во зависност од измерените податоци, но нивната употреба во овој случај е опаѓачка поради зголемената примена на уреди (**on-line particle size monitors**). Нивната голема вредност е во дизајнот и оптимизацијата на циклусите користејќи хидроциклони со примена на компјутерска симулација.

На пример, **Krebs Engineering** применуваат математички модели во затворени циклуси (мелење-класирање) и предвидуваат дека дво-стадијалното циклонирање, како спротивност на едностадијалното циклонирање, овозможува 6% зголемување на капацитетот во мелничкиот циклус. Без помош на хидроциклонско моделирање би чинела финансиски средства и трошење на време.

Исто така, равенките се многу корисни при избор на хидроциклони за поединечни цели, крајна контрола на дијаметар на гранично зрно  $d_{50}$ , како и капацитетот преку подесување на големината на влезот, вортексот и апексот.

Компјутерскиот програм *CYCLONE* кој ги прифаќа горните равенки целосно одговара за потребите на математичко моделирање и програмирање во соодветен програм прилагоден за сите оперативни системи, *Basic*®, *Visual Basic 6.0*®, *Visual Studio 2008*® итн.

#### **4.0 Осврт кон досегашните и можните перспективни истражувања за моделирање и оптимизација на процесите за класирање**

Користејќи ги истражувањата од страна на **Славен Деушиќ [8]** и докторската дисертација на **Мирјана Голомеова [12]** за моделирање и оптимизација на ефикасноста на класирање во функција на различни независно променливи, како што се содржина на цврсто % во влезната руда, дијаметар на празнење на песок, дијаметар на преливна цевка (вортекс или апекс), притисок на влезната пулпа, дијаметар на хидроциклон, или пак дијаметар на гранично зрно  $d_{50}$ , како и добиените резултати од оптимизацијата и добиените математички модели може да се заклучи следното:

- Ефикасноста на класирање математички се моделира преку полином во форма на  $(E = a_1 - b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_{12})$ ,  $E = 49,3 - 5,43 \cdot x_1 + 1,60 \cdot x_2 + 5,48 \cdot x_{12}$ , каде што  $x_1$ ,  $x_2$  се густина на влезна пулпа, односно дијаметар на отворот за песок.
- Вредностите на овие коефициенти пред спомнатите независно променливи во математичкиот модел покажуваат дека влијанието на густината на влезната пулпа (5,43) е повеќе од три пати поголемо од влијанието на дијаметарот на отворот за песок.
- Вредноста на коефициентот  $b_{12}$  покажува изразена интеракциска врска помеѓу независно променливите (густина на влезна пулпа, односно дијаметар на отворот за песок), така да при понатамошни истражувања мора да се оптимизираат нивните големини.
- Негативниот знак пред вредноста  $- 5,43 \cdot x_1$  покажува дека било работено со густа пулпа, па затоа таа треба да се намалува, додека пак позитивниот предзнак  $+ 1,60 \cdot x_2$  покажува дека е потребно зголемување на дијаметарот на отворот за песок.
- Констатирано е дека во математичкиот модел за оптимална ефикасност на класирање, потребно е понатамошно намалување на густината на влезната пулпа, со истовремено зголемување на дијаметарот на отворот за празнење на песок, со темпо на намалување три пати поголемо од темпото на зголемување на дијаметарот на отворот за песок.
- Констатирано е дека процесот на класирање во хидроциклоните зависи од многу фактори и горенаведени независно променливи, така да понатамошни истражувања се неопходни (особено со развојот на информатичката

технологија), со цел за математичко моделирање за други влијателни фактори, со што впечатливо би довело до адекватна автоматизација на процесите на мелење и класирање, како пример на класичен затворен циклус во минералната технологија.

## **5.0 Примена на математички методи**

### **5.1 Подесување на податоци на база на пресметани големини**

По најдоброто подесување на големините кои претходно биле пресметани, најчесто е потребно да се подесат експерименталните податоци за да бидат конзистентни со пресметаните големини.

Најголемиот број на подесувачки техники всушност се начини за распределба на грешките во масените биланси  $\Delta_i$  помеѓу различно измерени вредности  $(a_i, b_i, c_i)$  за да дадат корегирани или подесени вредности  $(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i)$  кои се нумерички конзистентни на пресметаните големини. Така,

$$\Delta_i = a_i - \bar{\beta} \cdot b_i - (1 - \bar{\beta}) \cdot c_i \quad (29)$$

$$0 = \bar{a}_i - \bar{\beta} \cdot \bar{b}_i - (1 - \bar{\beta}) \cdot \bar{c}_i \quad (30)$$

Наједноставно подесување е да се претстави дека измерените грешки се пропорционални на компонентните големини во секоја мерна точка.

$$a_i - \frac{\Delta_i}{2} = \bar{\beta} \cdot b_i + \bar{\beta} \cdot \frac{\Delta_i}{2} + (1 + \bar{\beta})c_i + (1 + \bar{\beta}) \cdot \frac{\Delta_i}{2} \quad (31)$$

$$\bar{a}_i = a_i - \frac{\Delta_i}{2}; \quad \bar{b}_i = b_i + \frac{\Delta_i}{2}; \quad \bar{c}_i = c_i + \frac{\Delta_i}{2} \quad (32)$$

Оваа процедура не обезбедува дека со подесените компоненти се дополнува до извесно обединување. Ако една од компонентите е измерена со разлики (на пример, појава на нерастворени во хемиските анализи) помали противречности можат да се абсорбираат во таа компонента. Ако компонентите се комплетно одредени (на пример, ситова анализа) можно да се корегираат големините и да се нормализираат овие податоци. Овој метод е сосема неограничен.

Методот на најмали квадрати исто така може да се користи да ги распредели грешките, за да ја минимизираат сумата на квадратите на подесувања од измерените вредности на најдобро подесените податоци.

$$0 = (a_i - \Delta a_i) - \bar{\beta} \cdot (b_i - \Delta b_i) - (1 - \bar{\beta}) \cdot (c_i - \Delta c_i) \quad (33)$$

Па со одземање на равенката (33) со равенката (29):

$$\Delta_i = +\Delta a_i - \bar{\beta} \cdot \Delta b_i - (1 - \bar{\beta}) \cdot \Delta c_i \quad (34)$$

Каде се:  $\bar{a}_i = a_i - \Delta a_i$ ;  $\bar{b}_i = b_i - \Delta b_i$ ;  $\bar{c}_i = c_i - \Delta c_i$

Сега сумата на квадратите за да биде минимизирана за секоја компонента е предмет за присилување во равенката,

$$S_i = \Delta a_i^2 + \Delta b_i^2 + \Delta c_i^2 \quad (35)$$

Равенките можат да се комбинираат, да се елиминира  $\Delta a_i$  во равенката (34) и минимизира  $S_i$  со земање во предвид на изводот во однос кон секоја од непознатите ( $\Delta b_i$  и  $\Delta c_i$ ) и изедначување на резултатот со нула. Ова може да се прикаже преку:

$$\Delta a_i = +\Delta_i/k; \quad \Delta b_i = -\Delta_i \cdot \bar{\beta}/k; \quad \Delta c_i = -\frac{\Delta_i(1 - \bar{\beta})}{k} \quad (36)$$

Каде:

$$k = [1 + \bar{\beta}^2 + (1 - \bar{\beta})^2] \quad (37)$$

Равенката покажува дека пресметката на трите претходни остатоци зависи само од еден број  $k$ . Вакво редуцирање во пресметките е воопштено од францускиот математичар **Lagrange**.

### 5.2 Метод на Lagrange множители

Овој метод се користи да се поедностави минимизацијата или максимизацијата на проблемите кои се предмет на условите или присилбите. Овие присилби се изразуваат на таков начин што тие се еднакви на нула. Во тој случај равенката може да се напише како:

$$0 = +\Delta_i - \Delta a_i + \bar{\beta} \cdot \Delta b_i + (1 - \bar{\beta}) \cdot \Delta c_i \quad (38)$$

Со цел да се минимизира со сумата на квадратите се модифицира ( $S_m$ ) со додавање на секоја од овие присилни равенки со множење со **Lagrange** множители, така да добиваме:

$$S_m = S + \sum_j \lambda_j \cdot \text{constraint } j \quad (39)$$

Треба да се забележи дека ова приближување е валидно ако компонентата има повеќе од една присилба над тоа, како што е случај во повеќето комплексни циклуси. Во тој случај имаме:

$$S_m = \Delta a_i^2 + \Delta b_i^2 + \Delta c_i^2 + 2 \cdot \lambda_i \cdot [+ \Delta_i - \Delta a_i + \bar{\beta} \cdot \Delta b_i + (1 - \bar{\beta}) \cdot \Delta c_i] \quad (40)$$

Модифицираната сума после тоа се диференцира во однос на секоја од непознатите (остатоци или множители) и **Lagrange** множителите се користат за замена на остатоците, така што се намалуваат потребните пресметки:

$$\frac{\partial S_m}{\partial \Delta a_i} = 2\Delta a_i - 2\lambda_i = 0 \text{ или } \Delta a_i = \lambda_i \quad (41)$$

$$\Delta b_i = -\bar{\beta} \cdot \lambda_i \text{ и } \Delta c_i = -(1 - \bar{\beta}) \cdot \lambda_i \quad (42)$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial \lambda_i} = 2[+\Delta_i - \Delta a_i + \bar{\beta} \cdot \Delta b_i + (1 - \bar{\beta}) \cdot \Delta c_i] = 0 \quad (43)$$

$$\Delta_i = +\lambda_i[+1 + \bar{\beta}^2 + (1 - \bar{\beta})^2] \quad (44)$$

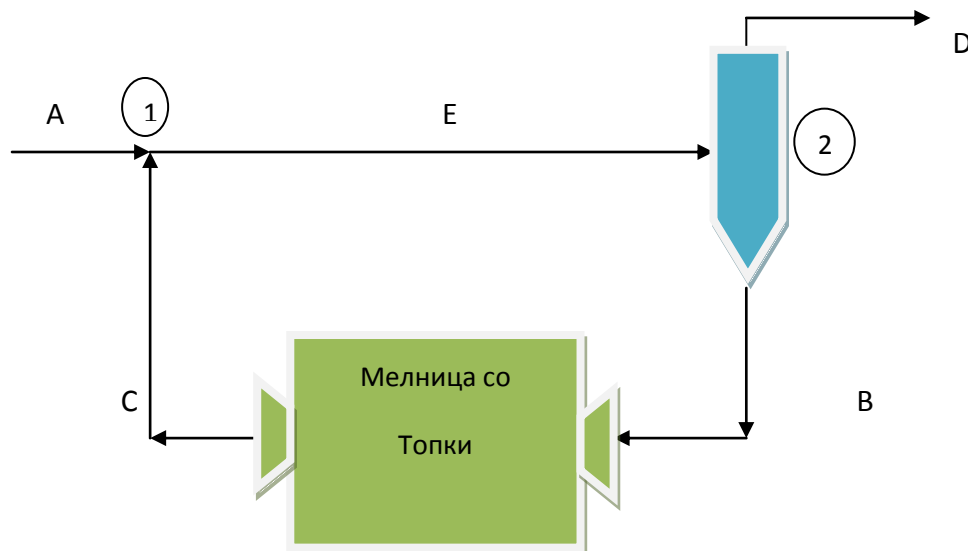


Ако се познати варијациите, тогаш имаме:

$$S = \frac{\Delta a_i^2}{V_{ai}} + \frac{\Delta b_i^2}{V_{bi}} + \frac{\Delta c_i^2}{V_{ci}} \quad (45)$$

Примената на ова приближување кон **“curve-fitting”** за општи проблеми, математички е многу комплексно, меѓутоа е битно и суштествено за апликанти кои програмираат или кои имаат желба за програмирање на вакви компјутерски програми. Примената на овие **Lagrange** множителите [23] ќе биде прикажана преку пример за затворен циклус на мелење во мелница со топки и хидроциклон.

При тоа, треба да се спомене дека при пресметката на моделните параметри се користат општите методи на најмали квадрати, линеарна регресија, пресметка на точноста или слично.



Слика 27

# Математичко моделирање, програмирање во затворени циклуси на Минералната технологија

Табела 2.

Tyler mesh (отвор на сито)	Влез во циккус	Хидроциклон			Излез од мелница
		влез	прелив	песок	
+8	0.1			nil	
+10	0.4			0.3	
+14	1.0	nil		0.2	nil
+20	1.2	0.4		0.2	0.1
+28	1.6	0.3		0.3	0.1
+35	2.2	0.3		0.6	0.2
+48	2.9	0.9	nil	1.2	0.7
+65	4.7	1.7	0.1	2.1	1.5
+100	8.1	4.7	0.3	5.7	4.9
+150	9.3	8.9	0.8	9.9	9.3
+200	12.8	21.6	2.6	25.4	24.6
+325	14.1	30.9	13.8	33.5	32.0
-325	41.6	30.3	82.4	20.6	26.6

$$A=1; A=D=1; E=\alpha; B=C=\alpha-1$$

(46)

$$\Delta_{(1)i} = \alpha \cdot (e_i - c_i) + (c_i - a_i)$$

(47)

$$\Delta_{(2)i} = \alpha \cdot (e_i - b_i) + (b_i - d_i)$$

(48)

$$S = \sum_i (\Delta_{(1)i}^2 + \Delta_{(2)i}^2)$$

(49)

$$\alpha = \frac{\sum_i (e_i - c_i) \cdot (c_i - a_i) + (e_i - b_i) \cdot (b_i - d_i)}{\sum_i (e_i - c_i)^2 + (e_i - b_i)^2}$$

(50)

$$\alpha = \frac{-(-111.86 - 753.25)}{24.32 + 117.80} = 6.0872$$

(51)

# Математичко моделирање, програмирање во затворени циклуси на Минералната технологија

Табела 3.

Tyler mesh (отвор на сито)	Проточни остатоци $\alpha = 6.0872$		Lagrange множители	
	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
+8	-0.10	0.0	0.0024	-0.0014
+10	-0.40	-1.53	-0.0114	0.0305
+14	-1.00	-1.02	0.0007	0.0103
+20	0.73	1.42	0.0023	-0.0235
+28	-0.28	0.30	-0.0108	-0.0109
+35	-1.39	-1.23	0.0160	0.0099
+48	-0.98	-0.63	0.0146	0.0013
+65	-1.98	-0.43	0.0408	-0.0168
+100	-4.42	-0.69	0.0947	0.0441
+150	-2.43	3.01	0.0985	-0.1042
+200	-6.46	-0.33	0.1477	-0.0804
+325	11.20	3.87	-0.2110	0.0617
-325	7.52	-2.75	-0.2148	0.1676

Табела 4.

Tyler mesh (Отвор на сито)	Влез во циклусот	Хидроциклон			Излез од мелница со топки
		влез	прелив	песок	
+8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
+10	0.4	0.1	0.0	0.2	0.1
+14	1.0	0.1	0.0	0.2	0.1
+20	1.2	0.3	0.0	0.3	0.1
+28	1.6	0.3	0.0	0.4	0.1
+35	2.2	0.5	0.0	0.6	0.1
+48	2.9	1.0	0.0	1.2	0.6
+65	4.7	1.9	0.1	2.2	1.3
+100	8.0	5.0	0.4	5.9	4.4
+150	9.2	8.9	0.9	10.4	8.8
+200	12.7	22.0	2.7	25.8	23.9
+325	14.3	30.0	13.7	33.2	33.1
-325	41.8	30.0	82.2	19.8	27.7

$$S_i = \Delta a_i^2 + \Delta b_i^2 + \Delta c_i^2 + \Delta d_i^2 + \Delta e_i^2 \quad (52)$$

$$(1): \alpha \cdot (e_i - \Delta e_i) - (a_i - \Delta a_i) - (\alpha - 1) \cdot (c_i - \Delta c_i) = 0 \quad (52)$$

$$(2): \alpha \cdot (e_i - \Delta e_i) - (d_i - \Delta d_i) - (\alpha - 1) \cdot (b_i - \Delta b_i) = 0 \quad (54)$$

$$Sm_i = S_i - 2\lambda_1 \cdot [\Delta_{(1)i} - \alpha \cdot \Delta e_i + \Delta a_i + (\alpha - 1) \cdot \Delta c_i] \quad (55)$$

$$-2\lambda_2 \cdot [\Delta_{(2)i} - \alpha \cdot \Delta e_i + \Delta d_i + (\alpha - 1) \cdot \Delta b_i] \quad (56)$$

$$\Delta_{(1)i} = \alpha \cdot e_i - a_i - (\alpha - 1) \cdot c_i \quad (57)$$

$$\Delta a = \lambda_1; \Delta b = \lambda_2 \cdot (\alpha - 1); \Delta c = \lambda_1 \cdot (\alpha - 1); \Delta d = \lambda_2; \text{и } \Delta e = -\alpha \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (58)$$

$$\Delta_{(1)} = \lambda_1 \cdot [\alpha^2 + 1 + (\alpha - 1)^2] + \lambda_2 \cdot \alpha^2 \quad (59)$$

$$\Delta_{(2)} = \lambda_1 \cdot \alpha^2 + \lambda_2 \cdot [\alpha^2 + 1 + (\alpha - 1)^2] \quad (60)$$

$$\Delta a = \lambda_1; \Delta b = \lambda_2 \cdot (\alpha - 1); \Delta c = \lambda_1 \cdot (\alpha - 1); \Delta d = \lambda_2; \Delta e = -\alpha \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (61)$$

### **5.3 Симулација на мелење и класирање во затворен циклус - матрична алгебра**

Комбинација мелница-класификатор, како оперативна единица во флотацијата, е најчесто решение на современата минерална технологија [28]. При што, прво правило за оптимален циклус на мелење е:

1. Во затворен круг мелница-класификатор се меле секогаш погрубо од колку што се бара за циклусот на флотирање. Со тоа се скратува потребното време за мелење, се смалува количината на мил и вкупната потрошувачка на електрична енергија по тони на смелена руда. Така да, помало е и абењето на мелните тела и облогата.

Од ова правило јасно произлегува, ако го статички посматраме, дека мора да се зголеми кружната шаржа, која ги намалува сите позитивни ефекти. Секое зголемување на кружната шаржа има последица да извесен дел од масата на рудата повеќе пати поминува низ процесот на мелење и класирање. Од тоа произлегува друго правило за оптимален циклус на мелење:

2. Бидејќи ефикасноста на класирање е функција, пред се, само удел на доволно смелена руда во сите производи на системот мелница-класификатор, а потоа е функција и кружната шаржа, мора да се најде функционална зависност помеѓу ефикасноста и кружната шаржа.

$$E = \frac{c \cdot (a - b)}{a \cdot (a - b)} \cdot 100 \quad (62)$$

$$C = \frac{c - a}{a - b} \cdot 100 \quad (63)$$

Со математичка симулација може да се егзактно дефинира:

- I. Меѓусебната зависност помеѓу вредностите Е (ефикасност на класирање), С(кружна шаржа) и влијанието на величините а и b.
- II. Пореметувањето во системот мелење и класирање, кој влијае на процесот.

Со примена на матрична алгебра анализирани се многу мали промени на гранулометрискиот состав.

Поради тоа, поедини маси на зрна во производот на мелницата, претставени се во колони како квадрат на матрица а производот на класирање во дијагонални елементи.

Гранулометрискиот состав при влезот во мелницата е одреден со изразот:

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} = (f_i) \quad (64)$$

Каде  $f_i$  го означува уделот на масата на зрната со крупноста на класата  $i$ .

Ефикасноста на уситнување во мелницата прикажана е со следната матрица:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & \dots & m_{nn} \end{pmatrix} = (m_{ij}) \quad (65)$$

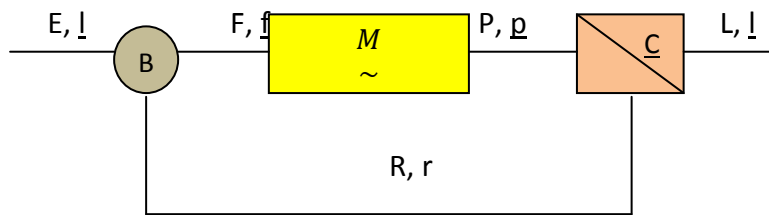
При што,  $m_{ij}$  е масен удел на класата  $j$ , која се менува континуирано со уситнувањето во мелницата во пофини класи на крупност  $i$ , која е застапена во производот на мелење.

Исто така, класирањето во хидроциклонот е изразено на матричен начин во следниот облик:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_{nn} \end{pmatrix} = (c_{ii}) \quad (66)$$

Каде елементот  $C_{ii}$  е еднаков на уделот на масата на зрната  $i$ , кои при класирање преминуваат во песокот на хидроциклонот.

Што значи, и класирањето со помош на матрица може да го симулираме, приближно до условите кои се одвиваат во процесот.



Слика 28.

На сликата, со големи букви е означен протокот на масата во агрегатот мелница-хидроциклон а со мали букви векторите на гранулометрискиот состав.

Според назначената шема во точката B, се обединуваат новиот влез и кружната шаржа.

$$\underset{\sim}{A} \pm \underset{\sim}{B} = \underset{\sim}{C}(C_{ij}) \quad (67)$$

Со замена следи

$$C_{ij} = a_{ij} \pm b_{ij} \quad (68)$$

Се добива равенката

$$\underset{\sim}{F}_f = \underset{\sim}{E}_e + \underset{\sim}{R}_r \quad (69)$$

Масениот удел на крупноќата  $p_i$  класата и после уситнувањето во мелницата, се состои од класа 1, 2 ... i во влезната руда, што се дефинира со изразот:

$$p_i = m_{i1}f_1 + m_{i2}f_2 + \dots m_{ii}f_i = \sum_{\mu=1}^i m_{i\mu}f_{\mu} \quad (70)$$

Во услови на уситнување кога не е можно колоните на матрицата  $f$  и  $p$  со квадратот  $(n-1)$ , да се пополнат со нулти елементи, од напред наведениот израз се добива следниот облик:

$$p_{ij} = \sum_{\mu=1}^n m_{i\mu}f_{\mu j} \quad (71)$$

Овој облик е идентичен со производот на матрицата:

$$C_{ij} = \sum_{\mu=1}^n a_{i\mu} b_{\mu j} \quad (72)$$

Инаку, самиот процес на уситнување во мелницата се дефинира со општа равенка:

$$\underset{\sim}{p} = \underset{\sim}{M} \cdot \underset{\sim}{f} \quad (73)$$

Додека, опишувањето на процесот на класирање опфаќа две равенки бидејќи, според распределбата на гранулометрискиот состав се врши раздвојување на текот на масата во прелив и песок.

$$\underset{\sim}{Rr} = \underset{\sim}{P} \cdot \underset{\sim}{Cp} = \underset{\sim}{r^*} \quad (74)$$

$$\underset{\sim}{R} = \underset{\sim}{P} \sum_{i=1}^n \underset{\sim}{C_{ii}} \underset{\sim}{p_i} = \sum_{i=1}^n \underset{\sim}{r_i^*} \quad (75)$$

Во нив симболот  $\underset{\sim}{r^*}$  означува дисконтинуирана распределба на гранулометрискиот состав, а  $\underset{\sim}{r_i^*}$  е проток на масата R.

Со пресметка на непознатите коефициенти  $\underset{\sim}{p}, \underset{\sim}{r}, \underset{\sim}{l}, \underset{\sim}{R}$  на основа на одредените параметри E, e, M, C, во системот на мелење и класирање, се постигнува со наведените равенки:

$$\underset{\sim}{F} = \underset{\sim}{P}, \underset{\sim}{E} = \underset{\sim}{L}, \underset{\sim}{F} = \underset{\sim}{E} + \underset{\sim}{R} \quad (76)$$

$$\underset{\sim}{L_1} = \underset{\sim}{Pp} - \underset{\sim}{Rr} \quad (77)$$

$$\underset{\sim}{Pp} = \underset{\sim}{M} \cdot \underset{\sim}{Ff} = \underset{\sim}{M} (\underset{\sim}{E^e} + \underset{\sim}{R^r}) \quad (78)$$



$$R_{\sim}^r = C_{\sim} \cdot P_p \quad (79)$$

$$P_p = M_{\sim} (E_{\sim}^e + C_{\sim} \cdot P_{\sim}^p) = E_{\sim} \cdot M_{\sim}^e + P_{\sim} \cdot M_{\sim} \cdot C_{\sim} p \quad (80)$$

$$P_{\sim} (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim}) p_{\sim} = E_{\sim}^M e \quad (81)$$

$$P_p = E_{\sim} (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim})^{-1} M_{\sim}^e = p_{\sim}^* \quad (82)$$

Каде  $p_{\sim}^*$  означува дисконтинуирана распределба на гранулометрискиот состав на производот, сумата  $p_i^*$  еднаква е на протокот на масата  $P$  низ мелницата. Симболот  $I$ , претставува матрична единица, која има во дијагоналните елементи 1, а во другите елементи 0.

Со решавање на равенката со замена на равенките, се добиваат релации за дефинирање на  $R$  и  $r_{\sim}$ .

$$R = \sum_{i=1}^n C_{ii} p_i^* \quad (83)$$

$$r_{\sim} = (E/R) C_{\sim} (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim})^{-1} M_{\sim}^e \quad (84)$$

Исто така, со решавање на равенките се одредува гранулометрискиот состав на производот од мелење.

$$L_{\sim}^1 = E_{\sim} (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim})^{-1} M_{\sim}^e - E_{\sim}^C (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim})^{-1} M_{\sim}^e \quad (85)$$

$$1_{\sim} = \left[ (I_{\sim} - C_{\sim}) (I_{\sim} - M_{\sim} C_{\sim})^{-1} M_{\sim} \right] e_{\sim} = K_{\sim} \cdot e_{\sim} \quad (86)$$

Значи, ако се одреди матрицата на мелницата  $M$  и матрицата на класификацијата  $C$ , може да се помогне на наведените равенки за пресметување на масата преку  $R$  и неговиот гранулометриски состав  $\tilde{r}$ , како и гранулометрискиот состав на преливот  $\tilde{1}$ .

Вредноста во средната заграда во равенката претставува се низ матрицата  $\tilde{K}$ , која може да се пресмета со алгоритми на матрицата содржани во поедини типови на компјутери. Додека со комбинација на матриците  $\tilde{I}, \tilde{M}, \tilde{C}$  во равенките може да се претстави со општи равенства:

$$\tilde{C} \left( \tilde{I} - \tilde{M} \tilde{C} \right)^{-1} \tilde{M} = \left( \tilde{I} - \tilde{C} \tilde{M} \right)^{-1} \tilde{C} \tilde{M}, \text{ и} \quad (87)$$

$$\tilde{K} = \left[ \tilde{M} + \left( \tilde{M} - \tilde{I} \right) \left( \tilde{I} - \tilde{C} \tilde{M} \right)^{-1} \tilde{C} \tilde{M} \right] \quad (88)$$

Кои содржат теоретски поставки до кои со свои истражувања дошле Herbst (28), Austin (29), Schönert (30).

#### 5.4 Регресионен модел за процесот на уситнување

Регресиониот модел во рамки на процесот на уситнување по пат на мелење, претставува меѓузависност помеѓу зависни променливи (крупноќата на производот од мелење), како проектирана величина и крупноста на влезот, како независно променлива а да е при тоа утврдена процесната кинетика [26]. Предуслов за изработка на регресионен модел е формирање на равенки, кои се добиени на основа на прецизно изведени опити и, кои се за процес од посебна значајност во анализираните технолошки целини.

Регресиониот модел за гранулометрискиот состав на производот од мелење, дефиниран е за поедини токови на маса  $I_i$ , кои се однесуваат на  $j$  класи на крупност. На основа на измерени вредности од испитувани параметри, воспоставена е функционална зависност во следната форма:

$$I_i = f(s, I, Kd, Kd') \quad (89)$$

$$\sum_{i=1}^n (\hat{I}i - Ii)^2 = \min \quad (90)$$

$$P = \int (I - F)(I - Ai \cdot Fi) \cdot dt \quad (91)$$

Додека, со решавање на повеќекратна квадратна регресија, утврдена група квадратни равенки, која претставува (регресионен модел) помеѓу целните величини и влијателните параметри:

$$(Ia - d_1)^2 = (Q_{00} + Q_{01}s + Q_{02}I + Q_{03}Kd + Q_{04}Kd')^2 \quad (92)$$

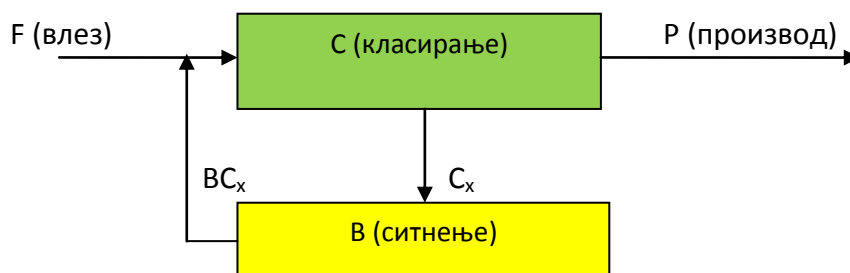
$$(Id_1 - d_2)^2 = (Q_{10} + Q_{11}s + Q_{12}I + Q_{13}Kd + Q_{14}Kd')^2 \quad (93)$$

Коефициентот  $Q_{ij}$  на назначената функција, се одредува од анализираниите целни и влијателни параметри. При што, отстапувањето од мерните вредности се во рамки на нормални дистрибуции:

$$S = \sum_{i=1}^n \quad (94)$$

$$\omega_i(di - \hat{d}i)^2 \quad (95)$$

Со тоа во врска, анализирана е шема на движење на масата за поедини делови на процесот прикажана е на сликата:



Слика 29.

Од податоците  $F+BC_x=x$ ,  $X=C_x+P$  произлегува дека е карактеристиката на уситнување е опфатена со функцијата  $B$  и класирањето со функцијата  $C$ .

Согласно со одвивањето на процесот, капацитетот на хранење на мелниците и потрошувачката на електрична енергија се експлицитно вклучени во основниот модел.

Со тоа се инкорпорираат сите основни параметри за потполна симулација на процесот на мелење, односно, дефинирање на производот од податоците на карактеристиките на влезот:

- Мерења-карактеризација  $B$ - $I$   $C$ -функција
- Делинеација на односот помеѓу  $B$  и  $C$  функцијата и структурните карактеристики на рудата.
- Одредување на граничниот капацитет на хранењето на мелницата.
- Мерење на потрошената енергија на уситнување во мелницата.

При што функцијата  $B$  добиена на основа на меливоста на рудата и потребната енергија за уситнување. За разлика од многуте истражувања кои се примениле за одредување на функцијата  $B$ , падот на тегот, успорената компресија, опит на удар и триење, користејќи хидрауличен уред кој многу добро симулира работа на мелници со топки и овозможува прецизно мерење на енергијата на уситнување. Истовремено, на овој начин воспоставена е зависност помеѓу функцијата- $B$  и карактеристиките на мелницата, како и нивоата на влезната енергија.

Одредувањето на функцијата  $C$  исто така е сложено. Неа ја измеривме во рамки на индустриски опити, детално одредување на поедини класи на крупност, добиени со одржување на регулирано хранење на мелницата.

### **6.0 Пример за моделирање и симулација на циклус на мелење во**

#### ***бакарен концентратор***

Во овој пример, е претставено проучувањето на моделирањето и симулацијата за подобрување на изведувањето на циклусот на мелење на погон за Флотација на Бакар во Грузија [10]. После детални проучувања на дадени примери, биле одредени распределбата на големината и содржината на цврстите супстанции на примероците. Потоа, користејќи ги овие информации бил пресметан балансот на масата во циклусот. Резултатите покажале дека постоечката изведба на погонот не била добра и барала подобрување. Користејќи ги добиените податоци, моделите биле развиени за мелниците и класификатори користени во циклусите. На крај, со користење на компјутерска симулација била оценети неколку алтернативи за подобра изведба.

Резултатите покажале дека изведбата на циклусот може да биде подобрена, а исто така може да се намали и потрошувачката на енергија.

Бакарниот концентратор има дизајниран капацитет од 1.610.000 тона во годината, се содржи од три паралелни циклуси на мелење. Додека два од нив се идентични и имаат годишен капацитет од 680.000 тона, третиот циклус има годишен капацитет од 250.000 тона.

Симулацијата на циклусот на уситнување со користење на математички модели на мелниците и техника на класификација е техника која сè повеќе се користи при уситнувањето, заради неговата економска исплатливост и неговата можност во исто време да разгледува повеќе вариабли.

Симулацијата ќе даде квантификувани информации за ефектите на предложените промени во изведбата на циклусот во однос на големината на дистрибуцијата на цврстите и водените текови и тн. Таквите информации тогаш ќе можат да бидат искористени да се провери прикладноста на постоечката опрема во поглед на променетите услови, и за избор на опрема.

Математичкото моделирање има за цел да воспостави систем на поеднаставување на процесите, со кои се утврдуваат најважните параметрите на работа во опсег на регулацијата. Овие процесни равенки претставуваат основни услови за одвивање на технолошкиот процес, како и за концепирање, оптимизација и автоматско управување на процесите.

Применетиот модел во однос на многубројните развиени модели (засновани на утврдени со почетни и гранични услови) има предност што неговата примена може подобро да се пресметуваат процеси кои се одвиваат во мелницата.

На овој начин процесот на уситнување во мелницата, е опишан со промената на гранулометрискиот состав во функција на времето на задржување и положбата во мелницата.

Утврдено е дека и двата овие параметри се менуваат на различни начини. Заради тоа транспортот на зрнестиот материјал низ мелницата, како и неговото уситнување е обработено во систем на равенки. При што е опфатено дисперзната состојба и параметри, кои го дефинираат таа состојба во функција на геометријата на празнење на мелницата  $z$ , времето на задржување на зрното во мелницата  $t$  и од големината на зрното  $x$ , земајќи ја при тоа рамнотежната маса. На тој начин, применетиот модел го опишува движењето на материјалот во правец на транспортот, аналогно на континуираниот процес кој се одвива во лабораториските и индустриските мелници.

Во рамки на изведениот опит, мерено е времето  $dt$ , при што количината на влез  $Q_V dt$  ја напушта комората на мелницата, како и еквивалентното смалување на масата обележената класа,  $dm_p^*$ ,  $V_F$  е зафатнина на мелницата:

$$dm_p^* = -\frac{m_p^*(t)}{V_F} \cdot Q_V dt \quad (96)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1 \quad (97)$$

Констатирано е, дека промената на масата  $m_i$ , се одвива во функција на временското задржување во мелницата и тоа двојно. Најпрво смалување на вкупната маса, па следи уситнување и потоа пораст, за класата на крупност, која се добива во рамки на уситнување на погрубите класи на крупност.

Овие ефекти се детерминирани со параметрите на брзината на уситнување и масената распределба на класи и тоа:

- ✓ Удел на уситнетата маса  $W_i$ , одредува маса на зрното, која се во интервалот на времето  $dt$  уситнува и преминува од покрупна во поситна класа,
- ✓ Коефициент на распределба  $b_{ij}$  претставува гранулометрискиот состав на уситнетите зрна, кои настануваат со формирање на класата  $i$ , пред уситнување на зрната во класа  $j$ .

По нормализацијата, параметрите на дистрибуција се добива:

$$\sum_{i=j+1}^n b_{ij} = 1 \quad (98)$$

За целосно опишување на процесот на уситнување, анализирано е влијанието на транспорт низ мелницата и тоа со примена на:

- ✓ Коефициент на брзина на усмерениот транспорт  $n_i$ , кој ја означува брзината на движење на зрната со крупност  $i$  низ мелницата и
- ✓ Дифизискиот коефициент  $D_i$ , кој се дефинира со попреченото движење во мелницата.

Што значи, во равенките се опфатени битни услови во процесот на уситнување според следната релација:

$$\begin{array}{ccc}
 m_i p_i v_i \longrightarrow & \begin{array}{c} -S_i m_i p_i \\ \sum_{j=1}^{i-1} S_j b_{ij} m_i p_i \end{array} & \longrightarrow m_i p_i v_i - \frac{\partial(m_i p_i v_i)}{\partial t} dl \\
 D_i \frac{\partial(m_i p_i)}{\partial t} \longrightarrow & & \longrightarrow D_i \frac{\partial(m_i p_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ D_i \frac{\partial(m_i p_i)}{\partial t} \right] dl
 \end{array}
 \quad (99)$$

Од кое следи, поопшта равенка во облик

$$-\frac{\partial m_v \cdot p_i}{\partial t} = d_{iv} [m_v p_i \vec{V}_i] - d_{iv} [D_i \text{grad}(m_v p_i)] - G_i \quad (100)$$

Каде е:

$\frac{\partial m_v \cdot p_i}{\partial t}$  —Промена на масата од  $i$  класата во времето и единицата на волумен, како последица од транспортот и уситнувањето.

$m_v$  —Вкупната маса на зрна во единица волумен

$p_i$  —Конвексниот тек на  $i$  класата во единица волумен

$m_v p_i \vec{V}_i$  —Брзина на транспорт на  $i$  класата

$D_i \text{grad}(m_v p_i)$  —Дифузен тек на  $i$  класата во единица волумен

$D_i$  —Дифузен коефициен за  $i$  класата

$G_i$  —Промена на масата на  $i$  класата во единица волумен по уситнувањето.

Промената на масата на зрното во секоја класа во времето, како поседица на преминувањето од покрупна класа и смалувањето на уситнетите зрна во пофина класа, се прикажува со следнава диференцијална равенка:

$$\frac{dm_i}{dt} = -w_i \cdot m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} W_j m_j \quad i = 1 \dots n \quad (101)$$

Со почетни услови  $m_i(t = 0) = m_i^0$

Каде параметрите на уситнување се прикажани во функција на времето на задржување во мелницата и гранулосотавот како производ на мелницата.

$$w_i = w_i(t, m_1, \dots, m_n) \quad (102)$$

$$b_{ij} = b_{ij}(t, m_1, \dots, m_n) \quad (103)$$

При кои се коефициентите  $w_i$  и  $b_{ij}$  не се менуваат во зависност од времето и уситнувањето се остварува со различни брзини, кои може да се опишат во систем на диференцијални равенки.

Така за вредност на коефициентот  $i=1$ , со замена во равенката од каде произлегува:

$$\frac{dm_1}{dt} = -w_1 \cdot m_1 \quad (104)$$

$$m_1 = m_1^0 \exp(-w_1 t) \quad (105)$$

За пресметување на непознатиот коефициент  $A_{i\mu}$  по пат на замена во равенката се добива:

$$\begin{aligned} \frac{dm_i}{dt} &= - \sum_{\mu=1}^i A_{i\mu} W_{\mu} \exp(-W_{\mu} t) \\ &= -w_i \sum_{\mu=1}^i A_{i\mu} \exp(-w_{\mu} t) + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{\mu=1}^j b_{ij} w_j A_{j\mu} \exp(-w_{\mu} t) \end{aligned} \quad (106)$$

Собирањето на сумата и префрлувањето на првиот член од десна на лева страна,

$$\sum_{j=1}^{i-1} \sum_{\mu=1}^j C_{ij\mu} = \sum_{\mu=1}^{i-1} \sum_{j=\mu}^{i-1} C_{ij\mu} \quad (107)$$



Се добива

$$\sum_{\mu=1}^i A_{i\mu}(w_i - w_{\mu}) \exp(-w_{\mu}t) = \sum_{\mu=1}^{i-1} \sum_{j=\mu}^{i-1} b_{ij} w_j A_{j\mu} \exp(-w_{\mu}t) \quad (108)$$

Решението на равенката (за  $\mu=i$  вредност на изразот  $(w_i - w_{\mu})$  е нула,  $(w_i - w_i) = 0$ ) произлегува:

$$\sum_{\mu=1}^{i-1} \exp(-w_{\mu}t) A_{i\mu}(w_i - w_{\mu}) = \sum_{\mu=1}^{i-1} \exp(-w_{\mu}t) \sum_{j=\mu}^{i-1} b_{ij} w_j A_{j\mu} \quad (109)$$

Додека, со споредување на коефициентите, кои припаѓаат на заедничката експоненцијална функција  $\exp(-w_{\mu}t)$ , се добива равенка за пресметување  $A_{i\mu}$  сукцесивно

$$A_{i\mu}(w_i - w_{\mu}) = \sum_{j=\mu}^{i-1} b_{ij} w_j A_{j\mu} \quad (110)$$

Исто така, со одредување на вредностите на коефициентот  $A_{ii}$  може да се добие со замена на почетните услови во равенката:

$$m_i(t=0)m_i^0 = \sum_{\mu=1}^i A_{i\mu} \quad (111)$$

Потоа, со примена на алгоритам се пресметува коефициентот  $A_{i\mu}$ , како што следи:

$$\left. \begin{aligned} A_{i\mu} &= \sum_{j=\mu}^{i-1} b_{ij} w_j A_{j\mu} / (w_i - w_{\mu}) \\ A_{ii} &= m_i^0 - \sum_{\mu=1}^{i-1} A_{i\mu} \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

Додека, со користење на претходните равенкати можат да се одредат поедини коефициенти на пример:

$$\begin{aligned} A_{11} &= m_i^0 \\ A_{21} &= b_{21}w_2A_{11}/(w_2 - w_{11}) \\ A_{22} &= m_2^0 - A_{21} \end{aligned} \quad (113)$$

$$A_{31} = (b_{31}w_1A_{11} + b_{32}w_2A_{21})/(w_3 - w_1) \quad (114)$$

$$A_{32} = b_{32}w_2A_{22}/(w_3 - w_2) \quad (115)$$

$$A_{33} = m_3^0 - A_{31} - A_{32} \quad (116)$$

$$A_{41} = (b_{41}w_1A_{11} + b_{42}w_2A_{21} + b_{43}w_3A_{31})/(w_4 - w_1) \quad (117)$$

Испитувани се карактеристиките на работата во кои низ мелницата тече константна количина на руда  $F$  ( $\text{mt}^{-1}$ ) со гранулометриски состав  $f_i$ , додека во комората на мелницата се наоѓа маса  $M$ , чиј гранулометриски состав е во функција на положбата во мелницата  $m_i(z)$ . Производот од мелење има гранулометриски состав  $p_i$ . Истиот е во функција на брзината на проток на пулпата низ мелницата, од што е неговото дефинирање нужно да се одреди со коефициентот на транспорт и дифузија  $D_i$ . Во услови на нормализација на процесот се добива:

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (118)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (119)$$

Временскиот интервал во кој рудата е изложена на уситнување, одреден е со мерење на задржувањето на обележениот примерок во мелницата. При што  $\emptyset(t)dt$  оној дел од обележан од масата на примерокот, која е внесена во мелницата во време  $t=0$ , и нејзиниот дел кој излегува од мелницата во временски интервал  $t$  до  $t+dt$ , големина  $i$  како:

$$dp_i = m_i(t)\emptyset(t)dt \quad (120)$$

Со интегрирање на времето од 0 до  $\infty$  се добива гранулометрискиот состав на уситнетиот производ:

$$p_i = \int_0^{\infty} m_i(t) \phi(t) dt \quad (121)$$

Со тоа во предвид се земени две гранични времиња на задржување на материјалот во мелницата:

- Струење во вид на чеп;
- Идеално мешање.

Во првиот случај секој дел од масата на материјалот, останува подеднакво долго во мелницата и протекува низ него во вид на чеп.

Времето на задржување се одредува со равенката:

$$\tau = \frac{m_i}{F_i t^{-1}} \quad (122)$$

Во друг случај, секое зрно, дозирано во мелницата веднаш се измеша со вкупната маса. Што значи дека делот на додадената маса  $m_i(t)$  го напушта мелницата  $A_{ij}m_i$  во моментот на хранење  $f_i$ .

Со решавање на равенката се добива времето на задржување во мелницата:

$$\phi(t) = \tau^{-1} \exp(-t/\tau^{-1}) \quad (123)$$

За одредување на крупноста на зрното во мелницата како последица на уситнувањето и транспортот врз основа на следење на додавањето во мелницата од одбележаните класи на крупност  $\tau=0$ , а со  $m^*(\tau)$  количина, се добива маса  $m_0^*$ , која е мерена на излезот од мелницата за чие пресметување е потребен многу сложен систем на равенки.

Решенијата на овие процесни равенки претставуваат параметри за пресметување на лабораториските димензии на индустриските величини и за оптимализација на процесот.

Во утврдувањето на основните карактеристики за уситнување при континуиран процес во мелницата, се оди од основните параметри: должина на мелницата  $L$ , положбата на променливата 1, (за  $l=0$ , материјал се внесува во мелница), брзина на

хранење со маса  $F$  и гранулометриски состав на влезот  $f_i$ . Мелницата се празни во услови кога е  $l=L$ , брзина на проток на масата  $P$  и крупноста на производот од мелење  $p_i$ . Карактеристика на времето на задржување на класата крупност во мелницата означена со  $H$ , ја одредува дистрибуцијата по должина на мелницата, додека положбата во комората на мелницата е одредена со  $h(l)$ , односно  $h(l)dl$  и  $\Delta t$  времето на задржување  $l$  и  $l+dl$ . Односно,

$$\int_0^L h(l)dl = 1 \quad (124)$$

Според тоа, стационарните услови на работата мелење во мелницата ја карактеризира следнава равенка:

$$\dot{F} = \dot{P} = \dot{M}_i \quad H = const \quad (125)$$

Меѓутоа, за правење на математички модел, применета е рамнотежата на масата за секоја класа на крупност  $i$  во поедини сегменти од комората на мелницата од  $l-(1/2)dl$  до  $l+(1/2)dl$ . При што големината на масата се менува во функција на промената на параметрите на проток и степенот на уситнување. Исто така, одредени се коефициентите на транспортот на пулпата низ мелницата, големината на класата  $i$  во попречниот пресек на мелницата во положба  $l$ , како што следи:

$$M_i(l) = U_i H h(l) m_i(l) - D_i H |h(l) m_i(l)|' \quad (126)$$

каде изразот  $|h(l) m_i(l)|'$  го означува првиот извод на положбата на променливата  $l$ . Додека производот на функцијата  $h(l)$  и  $m_i(l)$  е претставен со посложена функција  $\eta_i(l)$ .

$$\eta_i(l) = h(l) m_i(l) \quad (127)$$

Промената на масата во протокот е одредена со изразот:

$$\{u_i H \eta_i(l - 1/2dl) - D_i H \eta_i'(l - 1/2dl)\} - \{u_i H \eta_i(l + 1/2dl) - D_i H \eta_i'(l + 1/2dl)\} \quad (128)$$

Функцијата на задржување  $\tau$ , масата  $m^*$  дефинирана е со параметрите  $\eta_i$  и  $\eta_i'$  и вредностите како што е прикажано на сликата.

$$\dot{F}, f_i \rightarrow \boxed{M_i \left(1 - \frac{1}{2} dl\right) \rightarrow \begin{matrix} -W_i M_i \\ + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} w_j M_j \end{matrix} \rightarrow M_i \left(1 + \frac{1}{2} dl\right)} \rightarrow \dot{P}, p_i \quad (129)$$

Практично во мелницата просечното време на задржување се пресметува со комбинација на гранични услови.

$$\eta_i(1 - 1/2dl) = \eta_i(1) - (1/2)\eta_i' (1)dl \quad (130)$$

$$\eta_i(1 - 1/2dl) = \eta_i''(1) - (1/2)\eta_i'' (1)dl \quad (131)$$

Со замена на равенките се добива израз, во кој се параметрите  $u_i$  и  $D_i$  константни.

$$-u_i H \eta_i'(1) + D_i H \eta_i'' (1) \quad (132)$$

Вкупната диференцијална промена е опфатена и со равенката, која претставува решение на претходните равенки.

$$H \dot{\eta}_i = -u_i H \eta_i' + D_i H \eta_i'' - w_i H \eta_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} w_j H \eta_j \quad (133)$$

За вредност  $\eta_i' = 0$ , се добива систем на диференцијални равенки од втор ред.

$$0 = -u_i \eta_i' + D_i \eta_i'' - w_i \eta_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} w_j \eta_j \quad (134)$$

$$0 = \dot{F} f_i - u_i H \eta_i(0) + D_i H \eta_i'(0) \quad (135)$$

$$0 = \eta_i'(L) \quad (136)$$

Со решавање на овој систем на равенки е збир на експоненцијална функција.

$$\eta_i = \sum_{\mu=1}^i \{A_{i\mu} \exp(+\alpha_{\mu} l) + b_{i\mu} \exp(-\beta_{\mu} l)\} \quad (137)$$

Додека, вредностите на поедините коефициенти за наведените услови на одвивањена процесот на уситнување во мелницата се дефинира со следнава равенка:

$$\lambda = \frac{1}{L}, \delta i = \frac{u_i L}{D_i}, \varepsilon_i = w_i L^2 / D_i \quad (138)$$

$$Y_{ij} = \frac{b_{ij} w_j L^2}{D_i}, \omega_i = f_i \dot{M} L^2 / H D_i \quad (139)$$

$$\psi_i(\lambda) = - \sum_{\mu=1}^{i-1} \{A_{i\mu} \exp(+\alpha_{\mu} \lambda) + B_{i\mu} \exp(-\beta_{\mu} \lambda)\} \quad (140)$$

$$\psi_i'(\lambda) = \frac{d\psi_i}{d\lambda} = - \sum_{\mu=1}^{i-1} \{\alpha_{\mu} A_{i\mu} \exp(+\alpha_{\mu} \lambda) - \beta_{\mu} B_{i\mu} \exp(-\beta_{\mu} \lambda)\} \quad (141)$$

$$\psi_i(\lambda = 0) = \psi_{i0}; \quad \psi_i(\lambda = 1) = \psi_{i1}; \quad \psi_i'(\lambda = 0) = \psi_{i0}'; \quad \psi_i'(\lambda = 1) = \psi_{i1}'; \quad (142)$$

$$\alpha_i = (1/2)\{\sqrt{\delta_i + 4\varepsilon_i} + \delta_i\}, \quad \beta_i = (1/2)\{\sqrt{\delta_i + 4\varepsilon_i} - \delta_i\} \quad (143)$$

$$\Delta_i = \alpha_i^2 \exp(+\alpha_i) + \beta_i^2 \exp(-\beta_i) \quad (144)$$

Со пресметување на изразот по  $\eta_i$  и  $(\lambda)$  се добива:

$$\eta_i(\lambda) = A_{ii} \exp(+\alpha_i \lambda) + B_{ii} \exp(-\beta_i \lambda) + \psi_i(\lambda) \quad (145)$$

$$A_{i\mu} = \left\{ Y_{i\mu} A_{\mu} - \sum_{v=\mu+1}^{i-1} Y_{iv} A_{v\mu} \right\} / \{ \alpha_{\mu}^2 - \delta_i \alpha_{\mu} - \varepsilon_i \}$$

(146)

$$B_{i\mu} = \left\{ Y_{i\mu} B_{\mu} - \sum_{v=\mu+1}^{i-1} Y_{iv} B_{v\mu} \right\} / \{ \beta_{\mu}^2 - \delta_i \beta_{\mu} - \varepsilon_i \}$$

(147)

$$A_{ii} = \{ (\delta_i \psi_{i0} - \psi_{i0} - \omega_i) \beta_i \exp(-\beta_i) + \alpha_i \psi_{ii} \} / \Delta i$$

(148)

$$B_{ii} = \{ (\delta_i \psi_{i0} - \psi_{i0} - \omega_i) \alpha_i \exp(+\alpha_i) + \beta_i \psi_{ii} \} / \Delta i$$

(149)

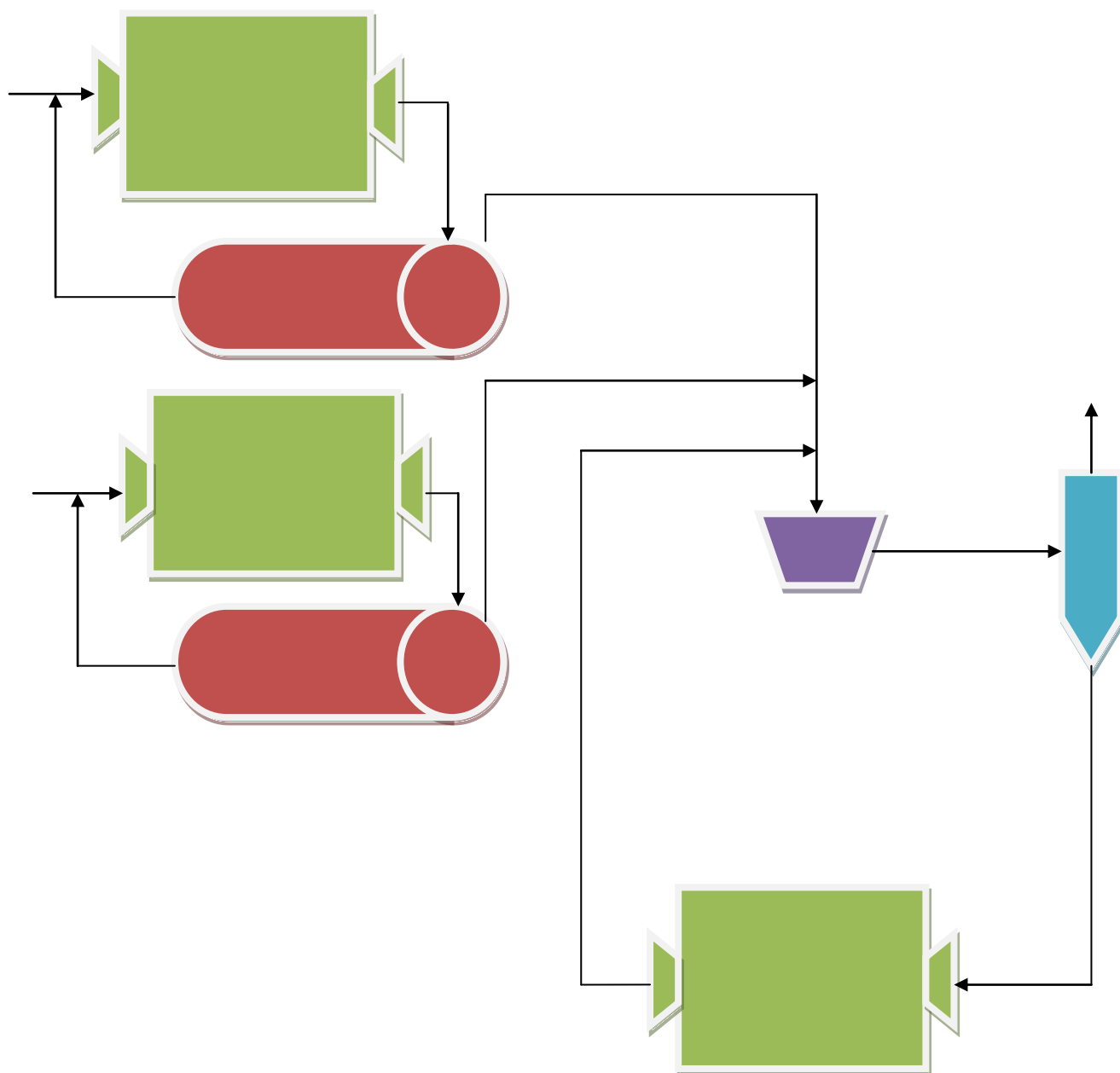
При што равенката за  $\eta_i$  е дефинирана за производ  $h(\lambda) m_i(\lambda)$  во услови на нормализација на процесот.

$$\sum_{i=1}^n \eta_i(\lambda) = \sum_{i=1}^n h(\lambda) m_i(\lambda) = h(\lambda)$$

(150)

$$m_i(\lambda) = \frac{\eta_i(\lambda)}{h(\lambda)} = \eta_i(\lambda) / \sum_{i=1}^n \eta_i(\lambda)$$

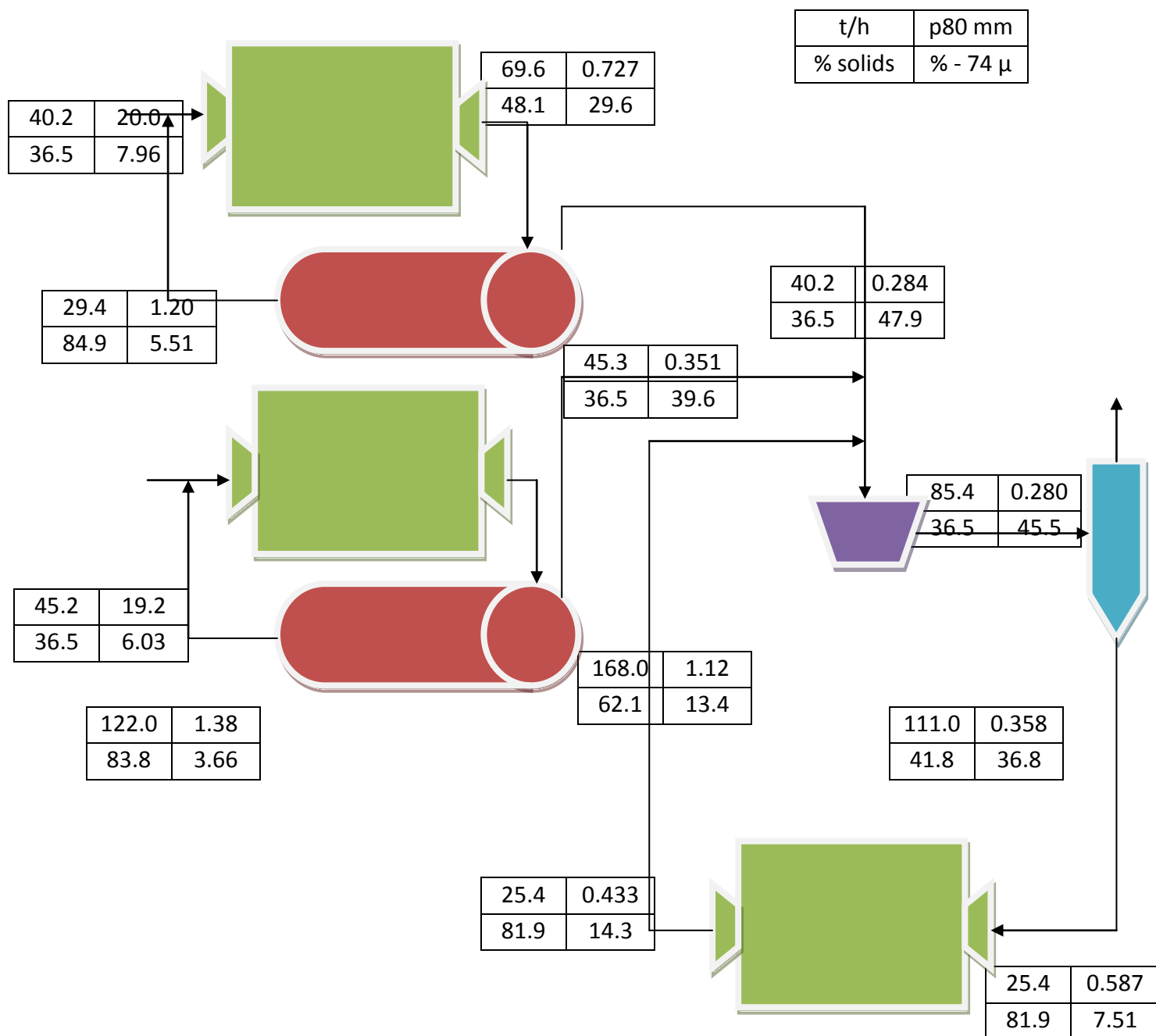
(151)



Слика 30. Постоечки циклус на мелење-класирање



За да се оцени изведбата на циклусот и да се добијат информациите потребни за студиите за моделирање, беа земени примероци од точките обележани на сликата.



Слика 31. Постоечки циклус на мелење-класирање со параметри

Моделот на топчеста мелница за операциите во мирна состојба вклучува две групи на параметри на моделот, т.е. функцијата на кршење ( $a_{ij}$ ) и функцијата на комбинираната стапка на кршење/празнење ( $r_i/d_i$ ).

$$f_i - r_i \frac{p_i}{d_i} + \sum_{j=1}^i a_{ij} \cdot r_i \cdot \frac{p_i}{d_i} - p_i = 0 \quad (152)$$

Класификаторите се моделирани користејќи го пристапот на крива на ефикасност. Математичкиот модел избран за студијата дава можност да се дефинираат елипсовидните криви на ефикасност. Општата форма на равенство е претставена подолу.

$$E_{oa} = C \left[ \frac{(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot X)(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha \cdot \beta^* \cdot X) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (153)$$

Каде:

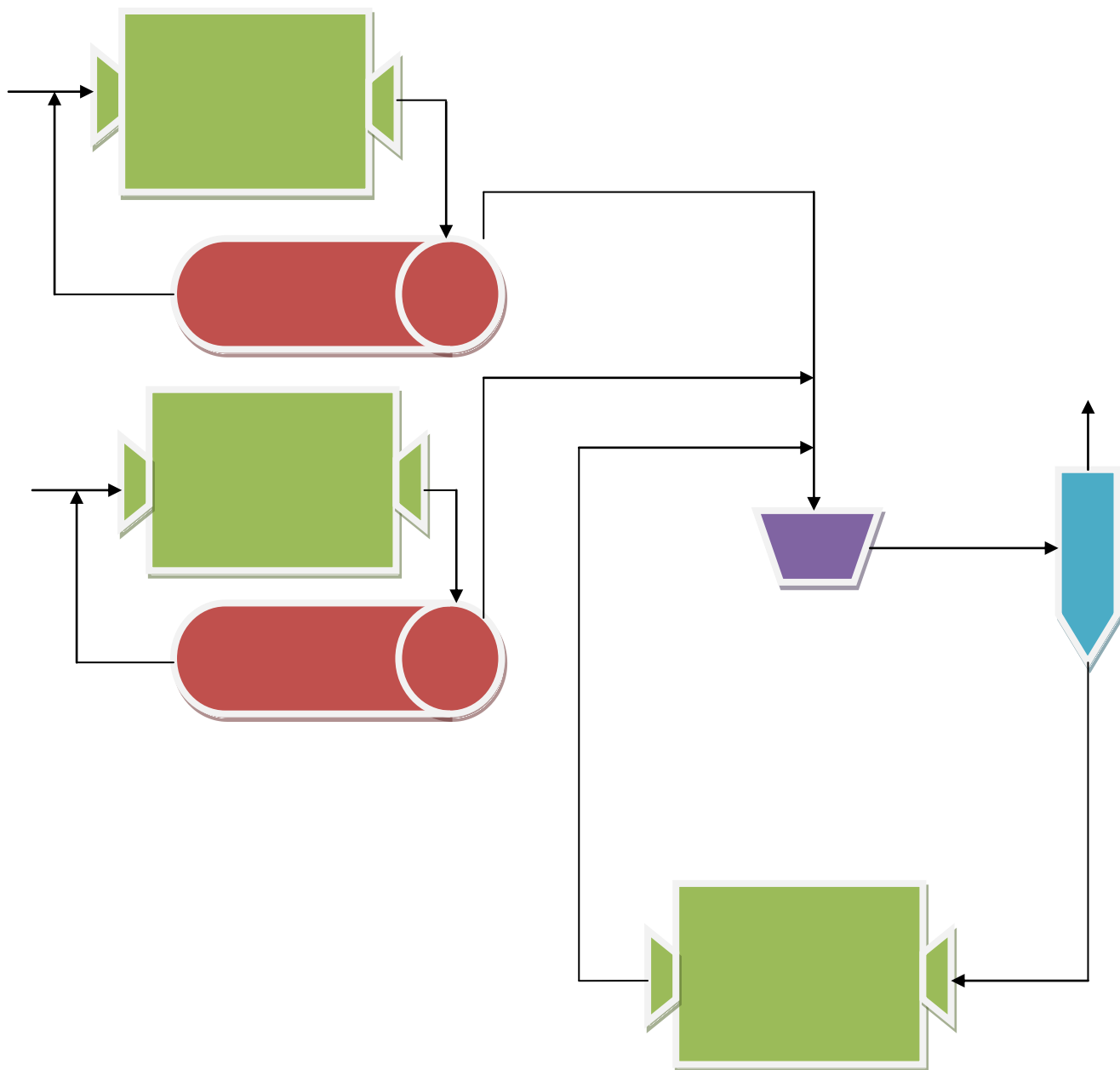
$$X = \frac{d_i}{d_{50c}} \quad (154)$$

Во случаите каде кривата на ефикасност не покажува однесување на елипсовидна крива, параметарот  $\beta$  е еднаков на нула и се добива поедноставен вид на ова равенство:

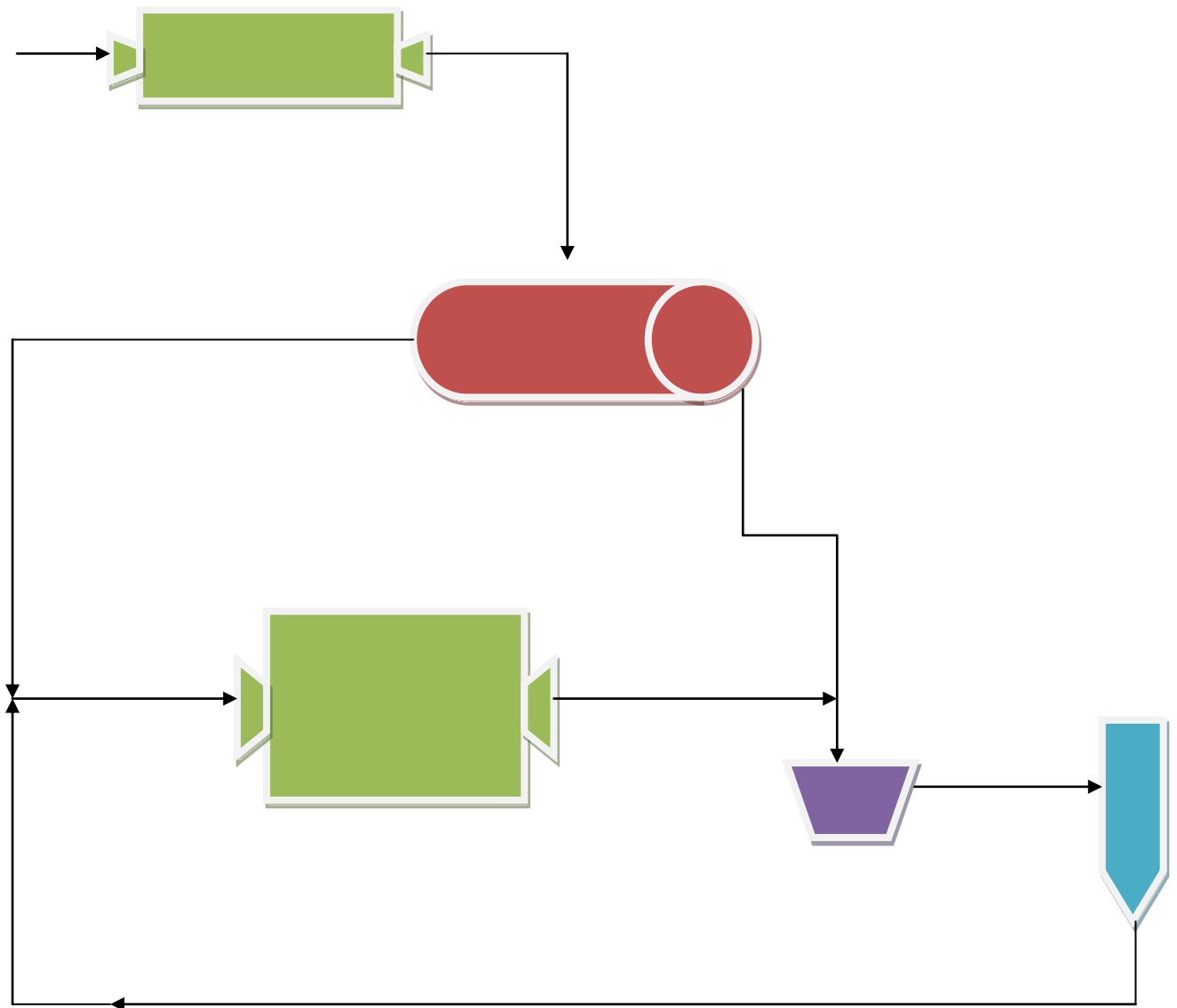
$$E_{oa} = C \left[ \frac{(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha \cdot X) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (155)$$

Резултатите на класификацијата можат да бидат моделирани во однос на  $d_{50}$  (corr), се прескокнува  $(1 - C)$ , „полукружната крива“ ( $\beta$ ), и остријата на кривата ( $\alpha$ ).

Податоците јасно покажуваат дека условите на погонот совршено можат да бидат симулирани од добиените модели. Така, беа тестирани неколку алтернативи на различни операции во текот на симулациските студии за да се добијат оптималните услови.



Слика 32. Постоечки циклус на мелење-класирање

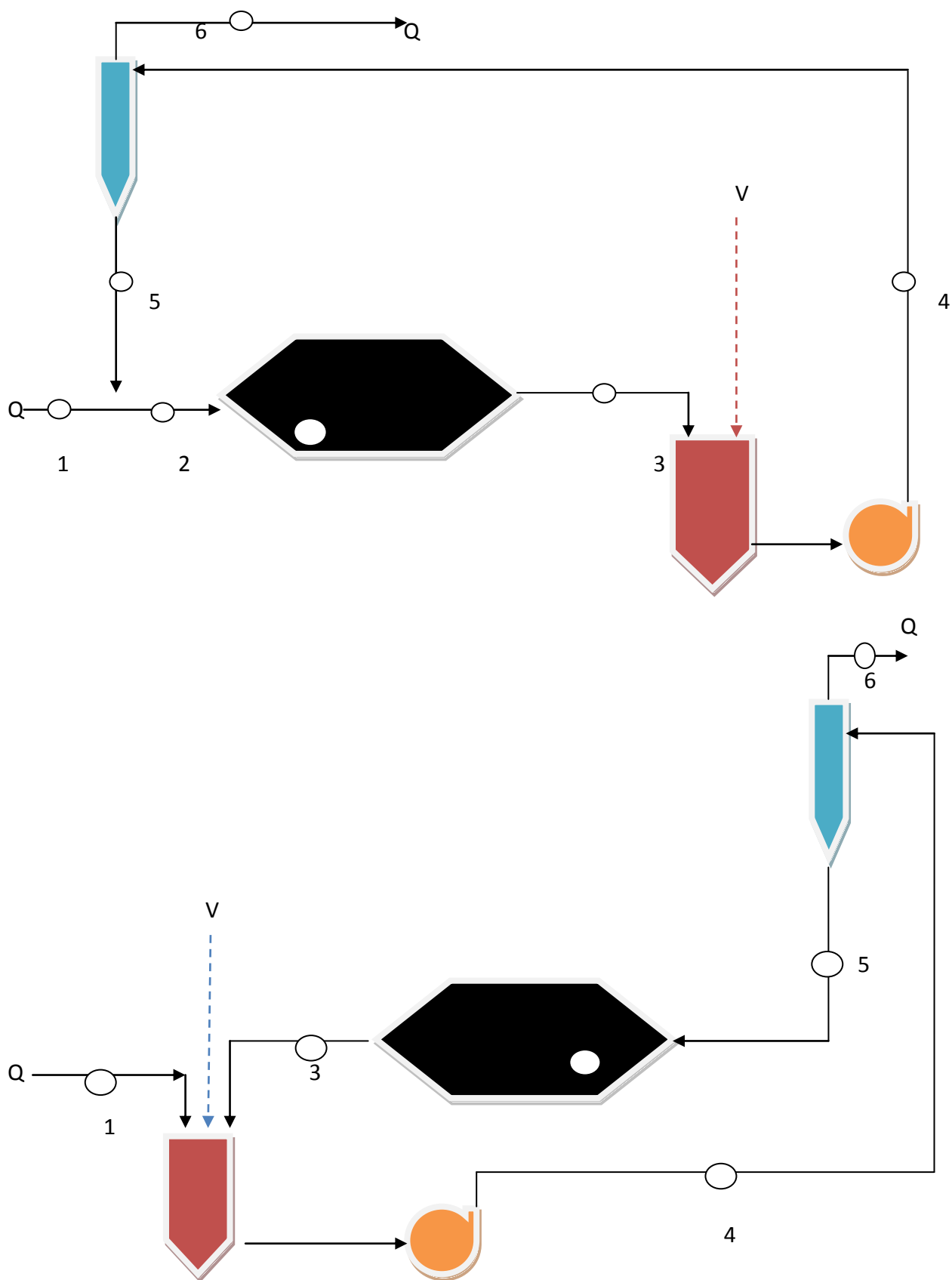


Слика 33. Алтернативен циклус на мелење-класирање по симулација

Во оваа студија, беше одредена изведбата на постоечкиот циклус на уситнување. Резултатите покажале дека постоечката изведба на циклусот на мелење може да биде подобрена и финоќата на дотокот на флотацијата може да биде зголемена до саканата вредност.

Биле предложени две алтернативи. Прво, оптимизација на постоечкиот циклус за да се произведе подобар производ и второ, користење на комбинација од шипкаста и топчеста мелница наместо постоечката мелница за дробење со две фази. Овие алтернативи дале поситен производ со повисок капацитет и флексибилност за зголемување на капацитетот. Покрај добивањето на поситен производ, комбинацијата на шипкаста и топчеста мелница, значително ќе ја намали потрошувачката на енергија.

**7.0 Постојни шеми на затворени циклуси на мелење-класирање**



$$Q = Q_1 = Q_6 \quad (156)$$

$$Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_6 + Q_5 = Q + Q_5 \quad (157)$$

$$\beta_3 = \beta_4 \quad (158)$$

$$Q_4\beta_4 = Q_5\beta_5 + Q_6\beta_6 \quad (159)$$

$$(Q + Q_5) \cdot \beta_4 = Q_5\beta_5 + Q\beta_6 \quad (160)$$

$$Q_5(\beta_4 - \beta_5) = Q(\beta_6 - \beta_4) \quad (161)$$

$$Q_5 = Q \frac{\beta_6 - \beta_4}{\beta_4 - \beta_5} \quad (162)$$

$$Q_1\beta_1 + Q_5\beta_5 = Q_2\beta_2 \quad (163)$$

$$Q\beta_1 + Q_5\beta_5 = (Q + Q_5)\beta_2 \quad (164)$$

$$\beta_2 = \frac{Q\beta_1 + Q_5\beta_5}{Q + Q_5} \quad (165)$$

$$Q_3R_3 + V = Q_4R_4 \quad (166)$$

$$(Q + Q_5)R_3 + V = (Q + Q_5)R_4 \quad (167)$$

$$R_4 = \frac{(Q + Q_5)R_3 + V}{Q + Q_5} \quad (168)$$

$$Q_4 R_4 = Q_5 R_5 + Q_6 R_6 \quad (169)$$

$$(Q + Q_5) R_4 = Q_5 R_5 + Q R_6 \quad (170)$$

$$Q_5 (R_4 - R_5) = Q (R_6 - R_4) \quad (171)$$

$$Q_5 = Q \frac{R_6 - R_4}{R_4 - R_5} \quad (172)$$

$$Q_1 R_1 + Q_5 R_5 = Q_2 R_2 \quad (173)$$

$$Q R_1 + Q_5 R_5 = (Q + Q_5) R_2 \quad (174)$$

$$R_2 = \frac{Q R_1 + Q_5 R_5}{Q + Q_5} \quad (175)$$

$$V_{p_4} = \frac{Q_3}{\rho_3} + Q_3 R_3 + V = (Q + Q_5) \cdot \left( \frac{1}{\rho_3} + R_3 \right) + V \quad (176)$$

$$V_{p_2} = V_{p_1} + V_{p_5} = \frac{Q}{\rho_1} + Q R_1 + \frac{Q_5}{\rho_5} + Q_5 R_5 = Q \left( \frac{1}{\rho_1} + R_1 \right) + Q_5 \left( \frac{1}{\rho_5} + R_5 \right) \quad (177)$$

$$\rho_2 = \frac{Q + Q_5}{\frac{Q}{\rho} + \frac{Q_5}{\rho_5}} = \frac{(Q + Q_5) \rho \rho_5}{Q \rho_5 + Q_5 \rho} \quad (178)$$

$$\rho_2 = \rho_3 = \rho_4 \quad (179)$$

$$\Delta_2 = \frac{M_{p_2}}{V_{p_2}} = \frac{Q + Q R_1 + Q_5 + Q_5 R_5}{Q \left( \frac{1}{\rho_1} + R_1 \right) + Q_5 \left( \frac{1}{\rho_5} + R_5 \right)} = \frac{Q(1 + R_1) + Q_5(1 + R_5)}{Q \left( \frac{1}{\rho_1} + R_1 \right) + Q_5 \left( \frac{1}{\rho_5} + R_5 \right)} \quad (180)$$



$$\Delta_4 = \frac{M_{p_4}}{V_{p_4}} = \frac{Q_3 + Q_3 R_3 + V}{(Q + Q_5) \left( \frac{1}{\rho_3} + R_3 \right) + V} = \frac{(Q + Q_5)(1 + R_3) + V}{(Q + Q_5) \left( \frac{1}{\rho_3} + R_3 \right) + V} \quad (181)$$

$$Q = Q_1 = Q_6 \quad (182)$$

$$Q_3 = Q_5 \quad (183)$$

$$Q_4 = Q_6 + Q_5 = Q + Q_5 \quad (184)$$

$$Q_5 = Q \frac{\beta_6 - \beta_4}{\beta_4 - \beta_5} \quad (185)$$

$$Q_5 = Q \frac{R_6 - R_4}{R_4 - R_5} \quad (186)$$

$$R_4 = \frac{Q_5 R_3 + Q R_1 + V}{Q + Q_5} \quad (187)$$

$$V_{p_4} = Q \left( \frac{1}{\rho_1} + R_1 \right) + Q_5 \left( \frac{1}{\rho_3} + R_3 \right) + V \quad (188)$$

$$\Delta_4 = \frac{Q(1 + R_1) + Q_5(1 + R_3) + V}{Q \left( \frac{1}{\rho_1} + R_1 \right) + Q_5 \left( \frac{1}{\rho_3} + R_3 \right) + V} \quad (189)$$

$$\rho_4 = \frac{(Q + Q_3)\rho\rho_3}{Q\rho_3 + Q_3\rho} \quad (190)$$

### **8.0 СПЕЦИЈАЛЕН ДЕЛ**

Во современата минерална технологија се почесто се оди кон примена на програмски пакети и симулација на постојните процеси со цел да се овозможи прв чекор кон евентуална автоматизација на технолошките процеси во минералната технологија.

До сега применетите компјутерски програми за пресметка на технолошките показатели во минералната технологија (ISKLIM и MASLIM) [22], компјутерските програми за пресметки на искористување, ефикасност на раздвојување на мономинерални или полиминерални сировини (KINETIC) [41], како и компјутерските програми за целосно прокажување на часовни, дневни, месечни и годишни извештаји при флотациска концентрација на минералните сировини (RUDNIK SASA), програмите за еволутивна оперативност (EVOP) се вистинскиот пат кон пробивот на програмирањето и симулацијата на сите процеси во минералната технологија.

Целосната пресметка на податоците всушност е комплексно и потребно е целосно изложување на техниките кои можат да се применат, вклучувајќи ги нивните предности или недостатоци, што е предмет на одделно изучување или истражување

За таа цел во оваа проектна задача се прави обид да се програмираат, поеднставни или посложени циклуси на мелење и класирање со цел да се избегнат макотрпните пресметки и решавања на проблемите кои се барат од поставената задача. Програмите користат **Basic** подршка која едноставно може да се трансформира во посовремен пакет.

Се работи за примена и разработка на повеќе програми кои помагаат наместо макотрпни пресметки и добивање на голем број на податоци, со помош на математички операции во програмските пакети да се распределат или подесат (корегираат) грешките, така да наједноставно е подесувањето да се претстави како метод дека измерените грешки се пропорционални на компонентните вредности во секоја мерна точка.

Методот на најмали квадрати исто така може да се користи да ги распредели грешките, за да ја минимизираат сумата на квадратите на подесувања од измерените вредности на најдобро подесените податоци.

Во конкретниот случај ќе бидат разработени компјутерски програми **LAGRAN**, **WEGHTRE**, **WILMAN**, а програмите користат Basic подршка која едноставно може да се трансформира во посовремен пакет на програмски јазик. Овие програмски разработени и адаптирани за примена во магистерскиот труд можат да се сретнат во

повеќе варијанти или разни дизајни, но всушност сите се однесуваат за подесување и корекција на преголемиот број на податоци кои се добиваат при експерименталните истражувања, а истите со математички операции со примена на компјутерските програми се дотеруваат или корегираат.

Всушност, **LAGRAN** (Reconcillation of excass data by non-weighted least squares), **WEGHTRE** (Reconcillation of excass data by weighted least squares) или **WILMAN** (Reconcillation of excass data by variances in mass equation) се програми кој потпомагаат во макотрпните пресметки кога се работи за процеси кои продуцираат два производи, а подесувањето на податоците од тие производи е цел на математичките операции за минимизација на направените грешки кои се појавуваат при мерење на преголем број на испитувања.

Примената на компјутерскиот програм **CYCLONE** придонесува кон ефикасна презентација на одредување на одделни битни карактеристики на хидроциклоните, како што се ефикасното одредување на дијаметарот на граничното зрно, дијаметар на хидроциклонот или друг податок за кој сме заинтересирани да го програмираме.

Програмот за едноставен затворен циклус на мелење-класирање **MINTEN - 3** (мелница – хидроциклон) е направен во Visual studio 2008 и овозможува брзо и ефикасно решавање на проблемот.

Програмот за затворен циклус на едностадијално мелење – двостадијално мелење **MINTEN - 2** во спирални класификатори е направен во Visual studio 2008 и овозможува брзо и ефикасно решавање на проблемот.

Програмите за двостадијално мелење со комбинирано класирање на механички класификатор и хидроциклон **MINTEN - 1** е направен во Visual studio 2008 и овозможува брзо и ефикасно решавање на проблемот поставен со проектната задача и дава можности за имплементирање и програмирање на слични или посложени проблеми кои се појавуваат во индустриската пракса на Минералната технологија.

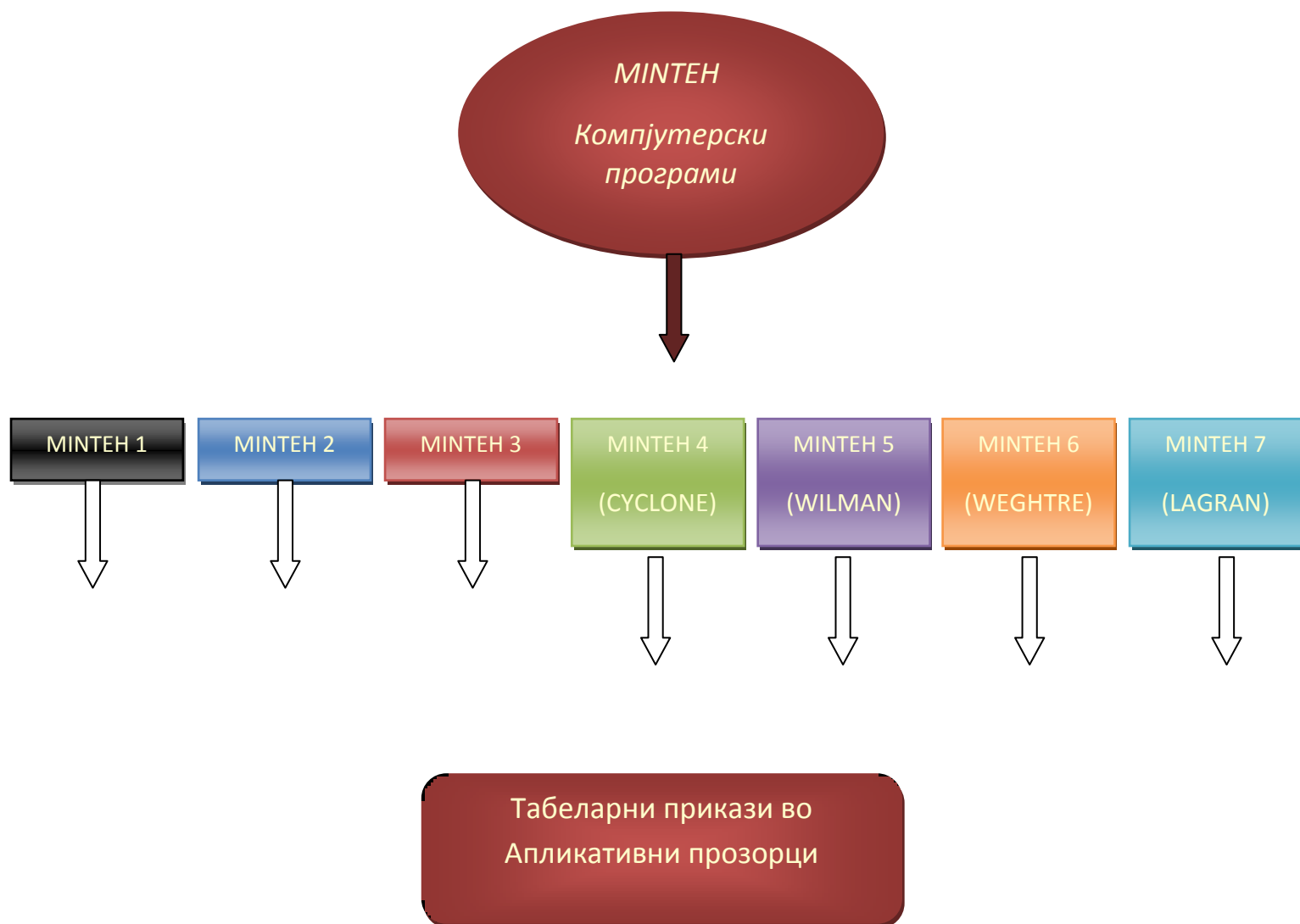
Всушност, се работи за седум компјутерски програми кои се изработени, разработени или адаптирани за ефикасно прикажување на поедини потпроцеси или процеси кои се појавуваат при презентација на класични, едноставни или посложени процеси на затворени циклуси на мелење и класирање, при што се користат соодветни програми во разни програмски јазици: **Basic®**, **Visual Basic 6.0®**, **Visual Studio 2008®** итн.

## Математичко моделирање, програмирање во затворени циклуси на Минералната технологија

---

Во магистерскиот труд се разработени седум различни програми означени како: **MINTEN – 7** (LAGRAN), **MINTEN – 6** (WEGHTRE), **MINTEN – 5** (WILMAN), **MINTEN – 4** (CYCLONE), **MINTEN – 3**, **MINTEN – 2** и **MINTEN – 1**.

За сите нив е разработена постапката, алгоритмите и кодовите, а истите можат да се користат за сите податоци кои се достапни на истражувачите, лабораториски или индустриски испитувања итн.



## 8.1 СПЕЦИЈАЛЕН ДЕЛ (Програми)

### MINTEH 7

#### LAGRAN – PROGRAM

```
REM LAGRAN BY B.A.WILLS 5 OCT.1984
REM SIMPLE NODE ADJUSTMENT BY LEAST SQUARES:MODE 7
REM FOLLOWED BY LAGRANGIAN MULTIPLIERS
PRINT"Nature of input (e.g.feed , rougher con,":PRINT"etc":INPUTF$
PRINT"Nature of product 1 (e.g concentrate,":PRINT"cyclone o/f,etc":INPUTP$
PRINT"Nature of product 2":INPUTQ$
PRINT"Number of components (e.g.assays, water/solids, size fractions, etc)":INPUTN
DIMC$(N):DIMF(N):DIMP(N):DIMQ(N):DIMAF(N):DIMAP(N):DIMAQ(N): DIMX(N):DIME(N)
FOR A=1 TO N
PRINT"Name of component"; A
INPUTC$(A)
PRINTC$(A);"in";F$:INPUTF(A)
PRINTC$(A);"in";P$:INPUTP(A)
PRINTC$(A);"in";Q$:INPUTQ(A)
NEXTA
REM CALC X AND RESIDUAL E
REM BEST FIT X=D/G WHERE D=SUM OF (F-Q)(P-Q)/SUM OF SQR(P-Q)
D=0:G=0
FOR B=1 TO N
X(B)=100*(F(B)-Q(B))/(P(B)-Q(B))
D=D+(((F(B)-Q(B))*(P(B)-Q(B))))
G=G+((P(B)-Q(B))*(P(B)-Q(B)))
NEXTB
XB=D/G:REM XB=BEST FIT X
K=1+(XB*XB)+((1-XB)*(1-XB))
REM CALCS OF ADJUSTED COMPONENTS
FOR J=1 TO N
E(J)=F(J)-(XB*P(J))-(Q(J)*(1-XB))
AF(J)=F(J)-(E(J)/K)
AP(J)=P(J)+(E(J)*XB/K)
AQ(J)=Q(J)+((E(J)*(1-XB))/K)
NEXT J
REM PRINT RESULTS (B.B.C. FORMAT)
```

```
PRINT TAB(25);"ACTUAL";TAB(63);"ADJUSTED"  
PRINT"COMPONENT";  
PRINT  
TAB(15);"INPUT";TAB(24);"PROD.1";TAB(34);"PROD.2";TAB(48);"X";TAB(55);"INPUT";TAB(64  
);"PROD.1";TAB(74);"PROD.2" @%=&2020A:REM SETS 2 DECIMAL PLACES AND FIELD  
FORMAT  
PRINT:PRINT  
FOR Z=1 TO N  
PRINTC$(Z),F(Z),P(Z),Q(Z),X(Z),AF(Z),AP(Z),AQ(Z)  
NEXTZ  
PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"X= ";P$;"/";F$;" AS %"  
  
PRINT:PRINT:PRINT"BEST FIT VALUE OF ";P$;"/";F$;" IS ";XB*100;"%"  
  
PRINT:PRINT:PRINT"INPUT=";F$;"," PROD.1=";P$;"," PROD.2=";Q$
```

### RUN 1-ПОЕДИНИЧНИ КЛАСИ

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

-106 in OVERFLOW  
? 0.1

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
425	3.60	2.40	13.30	88.99	3.88	2.17	13.26
355	3.20	2.00	13.40	89.47	3.52	1.73	13.35
300	3.90	2.10	11.10	80.00	3.66	2.30	11.14
250	3.50	2.10	10.40	83.13	3.43	2.16	10.41
212	5.50	3.40	18.70	86.27	5.65	3.27	18.68
180	5.30	3.30	12.90	79.17	5.00	3.55	12.95
150	6.60	5.90	12.90	90.00	6.82	5.72	12.87
125	7.90	8.00	7.10	88.89	7.88	8.02	7.10
106	10.20	11.00	0.10	92.66	9.69	11.43	0.18
-106	50.30	59.80	0.10	84.09	50.47	59.65	0.07

X = UNDERFLOW/FEED AS %  
BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 84.59335 %  
INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW  
Press any key to continue

### RUN 2 – КУМУЛАТИВНИ КЛАСИ

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

-106 in OVERFLOW  
? 0.1

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
425	3.60	2.40	13.30	88.99	3.84	2.20	13.27
355	6.80	4.40	26.70	89.24	7.31	3.96	26.62
300	10.70	6.50	37.80	86.58	10.94	6.29	37.76
250	14.20	8.60	48.20	85.86	14.34	8.48	48.18
212	19.70	12.00	66.90	85.97	19.94	11.80	66.87
180	25.00	15.30	79.80	84.96	24.90	15.38	79.81
150	31.60	21.20	92.70	85.45	31.70	21.12	92.69
125	39.50	29.20	99.80	85.41	39.58	29.14	99.79
106	49.70	40.20	99.90	84.09	49.31	40.53	99.96
-106	50.30	59.80	0.10	84.09	50.69	59.47	0.04

X = UNDERFLOW/FEED AS %  
BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 85.22193 %  
INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW  
Press any key to continue

**RUN 3 - ПОЕДИНЕЧНИ КЛАСИ (Индустриски податоци за дијаметри на отвори за  
песок  $d_p=100\text{mm}$  и  $d_p=110\text{mm}$ )**

Ca: C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

```
-74inUNDERFLOW
? 10.4
-74inOVERFLOW
? 62.0
```

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	19.00	32.00	0.20	59.12	18.82	32.11	0.28
417	7.70	13.50	0.50	55.38	7.95	13.36	0.40
295	11.30	18.00	2.00	58.13	11.31	17.99	1.99
208	12.30	14.50	8.90	60.71	12.21	14.55	8.94
147	5.50	4.90	7.30	75.00	5.77	4.75	7.19
104	6.50	4.50	9.30	58.33	6.50	4.50	9.30
74	5.70	2.20	9.80	53.95	5.48	2.33	9.89
-74	32.00	10.40	62.00	58.14	31.96	10.42	62.02

X= UNDERFLOW/FEED AS %  
BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 58.24906 %  
INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW  
Press any key to continue

Ca: C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

```
-74inUNDERFLOW
? 10.0
-74inOVERFLOW
? 55.6
```

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	17.00	31.30	0.00	54.31	18.29	30.52	-0.51
417	7.40	10.80	0.00	68.52	6.84	11.14	0.22
295	11.60	16.10	5.40	57.94	11.78	15.99	5.33
208	16.00	16.70	10.20	89.23	14.78	17.44	10.68
147	6.00	6.00	7.00	2100.00	6.26	5.84	6.90
104	7.80	5.40	10.50	52.94	7.54	5.55	10.60
74	7.30	3.70	11.30	52.63	6.90	3.94	11.46
-74	26.90	10.00	55.60	62.94	27.61	9.57	55.32

X= UNDERFLOW/FEED AS %  
BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 60.57445 %  
INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW  
Press any key to continue



## MINTEH 6

### WEGHTRE – PROGRAM

```
REM WEGHTRE BY B.A.WILLS 20 FEB.1985
REM ESTIMATION OF BEST FLOW RATE BY WEIGHTED RESIDUALS
REM LEAST SQUARES FOLLOWED BY LAGRANGIAN METHOD
PRINT"Nature of input (e.g.feed , rougher con,":PRINT"etc":INPUTF$
PRINT"Nature of product 1 (e.g concentrate,":PRINT"cyclone o/f,etc":INPUTP$
PRINT"Nature of product 2":INPUTQ$
PRINT"Number of components (e.g.assays, water/solids, size fractions, etc)":INPUTN
PRINT"Do all components have equal relative":INPUT"error Y/N? "FR$
IF FR$="Y" THEN E=1
DIMC$(N):DIMF(N):DIMP(N):DIMQ(N):DIMAF(N):DIMAP(N):DIMAQ(N):DIMX(N):DIME(N):DI
MVF(N):DIMVQ(N):DIMVQ(N)
FOR A=1 TO N
PRINT"Name of component"; A;" (e.g. %Sn, ":PRINT"water/solids,%125-250m, etc"
INPUTC$(A)
PRINTC$(A);"in";F$:INPUTF(A)
IF FR$="Y" THEN 170
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VF(A)=E*E*F(A)*F(A)/10000
PRINTC$(A);"in";P$:INPUTP(A)
IF FR$="Y" THEN 210
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VP(A)=E*E*P(A)*P(A)/10000
PRINTC$(A);"in";Q$:INPUTQ(A)
IF FR$="Y" THEN 250
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VQ(A)=E*E*Q(A)*Q(A)/10000
NEXTA
REM CALC X
REM BEST FIT X=D/G WHERE D=SUM OF (F-Q)(P-Q)/SUM OF SQR(P-Q)
D=0:G=0
FOR B=1 TO N
X(B)=100*(F(B)-Q(B))/(P(B)-Q(B))
D=D+(((F(B)-Q(B))*(P(B)-Q(B))))
G=G+((P(B)-Q(B))*(P(B)-Q(B)))
NEXTB
XB=D/G:REM XB=BEST FIT X WITH NO WEIGHTING
```

```
REM CALCULATION OF WEIGHTED BEST FIT
CB=XB
DW=0:GW=0:C=CB
FOR H=1 TO N
VR=VF(H)+(C*C*VP(H))+((1-C)*(1-C)*VQ(H))
GW=GW+((P(H)-Q(H))*(P(H)-Q(H)))/VR
DW=DW+(((F(H)-Q(H))*(P(H)-Q(H))))/VR
NEXT H
CB=DW/GW:REM WEIGHTED ESTIMATE
IF ABS(CB-C)<0.005 THEN 470
GOTO 380
XB=CB
REM CALCS OF ADJUSTED COMPONENTS
FOR J=1 TO N
K=VF(J)+(XB*XB*VP(J))+((1-XB)*(1-XB)*VQ(J))
E(J)=F(J)-(XB*P(J))-(Q(J)*(1-XB))
AF(J)=F(J)-(E(J)*VF(J)/K)
AP(J)=P(J)+(E(J)*XB*VP(J)/K)
AQ(J)=Q(J)+((E(J)*(1-XB)*VQ(J))/K)
A=E(J)*VF(J)/K:B=E(J)*XB*VP(J)/K:C=E(J)*(1-XB)*VQ(J)/K
NEXT J
PRINTTAB(25);"ACTUAL";TAB(63);"ADJUSTED"
PRINT"COMPONENT";
PRINTTAB(15);"INPUT";TAB(24);"PROD.1";TAB(34);"PROD.2";TAB(48);"X";TAB(55);"INPUT";T
AB(64);"PROD.1";TAB(74);"PROD.2" @%=&2020A:REM SETS 2 DECIMAL PLACES AND
FORMATS FIELD WIDTH
PRINT:PRINT
FOR Z=1 TO N
PRINTC$(Z),F(Z),P(Z),Q(Z),X(Z),AF(Z),AP(Z),AQ(Z)
NEXTZ
PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"X= ";P$;"/";F$;" AS %"
PRINT:PRINT:PRINT"BEST FIT VALUE OF ";P$;"/";F$;" IS ";XB*100;"%"
PRINT:PRINT:PRINT"INPUT=";F$;"," PROD.1=";P$;"," PROD.2=";Q$
```

### RUN 1-ПОЕДИНИЧНИ КЛАСИ

```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

425      3.60      2.40      13.30      88.99      3.80      2.32      12.91
355      3.20      2.00      13.40      89.47      3.44      1.92      12.81
300      3.90      2.10      11.10      80.00      3.51      2.20      11.55
250      3.50      2.10      10.40      83.13      3.33      2.15      10.61
212      5.50      3.40      18.70      86.27      5.53      3.39      18.66
180      5.30      3.30      12.90      79.17      4.83      3.46      13.29
150      6.60      5.90      12.90      90.00      6.77      5.79      12.81
125      7.90      8.00      7.10      88.89      7.89      8.01      7.10
106      10.20     11.00     0.10      92.66      9.81      11.39     0.10
-106     50.30     59.80     0.10      84.09     50.86     59.11     0.10

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS  86.02%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue
```

### RUN 2 – КУМУЛАТИВНИ КЛАСИ

```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

425      3.60      2.40      13.30      88.99      3.75      2.34      13.02
355      6.80      4.40      26.70      89.24      7.15      4.27      25.99
300     10.70      6.50      37.80      86.58     10.66      6.51      37.86
250     14.20      8.60      48.20      85.86     13.96      8.68      48.57
212     19.70     12.00     66.90      85.97     19.41     12.09     67.35
180     25.00     15.30     79.80      84.96     24.20     15.56     80.87
150     31.60     21.20     92.70      85.45     30.97     21.45     93.42
125     39.50     29.20     99.80      85.41     38.87     29.50    100.33
106     49.70     40.20     99.90      84.09     48.68     40.78    100.45
-106     50.30     59.80     0.10      84.09     51.07     58.85     0.10

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS  86.76%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue
```

**RUN 3 - ПОЕДИНЕЧНИ КЛАСИ** (Индустриски податоци за дијаметри на отвори за  
песок  $d_p=100\text{mm}$  и  $d_p=110\text{mm}$ )

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\BASIC2~1.200\qb11\QBASIC.EXE

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	19.00	32.00	0.20	59.12	18.73	32.44	0.20
417	7.70	13.50	0.50	55.38	7.84	13.26	0.50
295	11.30	18.00	2.00	58.13	11.24	18.08	2.00
208	12.30	14.50	8.90	60.71	12.18	14.59	8.93
147	5.50	4.90	7.30	75.00	5.77	4.78	7.10
104	6.50	4.50	9.30	58.33	6.53	4.49	9.28
74	5.70	2.20	9.80	53.95	5.53	2.21	10.01
-74	32.00	10.40	62.00	58.14	32.20	10.39	61.68

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 57.48%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\BASIC2~1.200\qb11\QBASIC.EXE

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	17.00	31.30	0.00	54.31	17.84	29.58	0.00
417	7.40	10.80	0.00	68.52	6.90	11.44	0.00
295	11.60	16.10	5.40	57.94	11.75	15.93	5.39
208	16.00	16.70	10.20	89.23	14.71	17.55	10.41
147	6.00	6.00	7.00	100.00	6.25	5.85	6.86
104	7.80	5.40	10.50	52.94	7.54	5.47	10.69
74	7.30	3.70	11.30	52.63	6.90	3.76	11.68
-74	26.90	10.00	55.60	62.94	27.59	9.94	54.43

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 60.33%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue

**MINTEH – 5**

**WILMAN – PROGRAM**

```
REM WILMAN BY B.A.WILLS 20 FEB.1985
REM ESTIMATION OF BEST FLOW RATE BY VARIANCE IN COMPONENT EQUATIONS
DATA ADJUSTMENT BY LAGRANGIAN MULTIPLIERS
PRINT"Nature of input (e.g.feed , rougher con,":PRINT"etc":INPUTF$
PRINT"Nature of product 1 (e.g concentrate,":PRINT"cyclone o/f,etc":INPUTP$
PRINT"Nature of product 2":INPUTQ$
PRINT"Number of components (e.g.assays, water/solids, size fractions, etc)":INPUTN
PRINT"Do all components have equal relative":INPUT"error Y/N? "FR$
IF FR$="Y" THEN E=1
DIMC$(N):DIMF(N):DIMP(N):DIMQ(N):DIMAF(N):DIMAP(N):DIMAQ(N):DIMX(N):DIME(N):DI
MVF(N):DIMVP(N):DIMVQ(N)
FOR A=1 TO N
PRINT"Name of component"; A;" (e.g. %Sn, ":PRINT"water/solids,%125-250m, etc"
INPUTC$(A)
PRINTC$(A);"in";F$:INPUTF(A)
IF FR$="Y" THEN 170
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VF(A)=E*E*F(A)*F(A)/10000
PRINTC$(A);"in";P$:INPUTP(A)
IF FR$="Y" THEN 210
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VP(A)=E*E*P(A)*P(A)/10000
PRINTC$(A);"in";Q$:INPUTQ(A)
IF FR$="Y" THEN 250
INPUT"Estimated relative standard deviation %"E
VQ(A)=E*E*Q(A)*Q(A)/10000
NEXTA
REM CALC X
FOR B=1 TO N
X(B)=100*(F(B)-Q(B))/(P(B)-Q(B))
NEXTB
REM CALCULATION OF WEIGHTED BEST FIT
DW=0:GW=0
FOR H=1 TO N
AA=VF(H)/((P(H)-Q(H))*(P(H)-Q(H)))
```

```
BB=VP(H)*(F(H)-Q(H))*(F(H)-Q(H))/((P(H)-Q(H))*(P(H)-Q(H))* (P(H)-Q(H))* (P(H)-Q(H))
CC=VQ(H)*(P(H)-F(H))*(P(H)-F(H))/((P(H)-Q(H))*(P(H)-Q(H))* (P(H)-Q(H))* (P(H)-Q(H))
VC=AA+BB+CC
DW=DW+((F(H)-Q(H))/((P(H)-Q(H))*SQR(VC)))
GW=GW+(1/SQR(VC))
NEXT H
XB=DW/GW
REM CALCS OF ADJUSTED COMPONENTS
FOR J=1 TO N
K=VF(J)+(XB*XB*VP(J))+((1-XB)*(1-XB)*VQ(J))
E(J)=F(J)-(XB*P(J))-(Q(J)*(1-XB))
AF(J)=F(J)-(E(J)*VF(J)/K)
AP(J)=P(J)+(E(J)*XB*VP(J)/K)
AQ(J)=Q(J)+((E(J)*(1-XB)*VQ(J))/K)
A=E(J)*VF(J)/K:B=E(J)*XB*VP(J)/K:C=E(J)*(1-XB)*VQ(J)/K
NEXT J
PRINTTAB(25);"ACTUAL";TAB(63);"ADJUSTED"
PRINT"COMPONENT";
PRINTTAB(15);"INPUT";TAB(24);"PROD.1";TAB(34);"PROD.2";TAB(48);"X";TAB(55);"INPUT";T
AB(64);"PROD.1";TAB(74);"PROD.2" @%=&2020A: REM SETS 2 DECIMAL PLACES AND
FORMATS FIELD WIDTH
PRINT:PRINT
FOR Z=1 TO N
PRINTC$(Z),F(Z),P(Z),Q(Z),X(Z),AF(Z),AP(Z),AQ(Z)
NEXTZ
PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"X= ";P$;"/";F$;" AS %"
PRINT:PRINT:PRINT"BEST FIT VALUE OF ";P$;"/";F$;" IS ";XB*100;"%"
PRINT:PRINT:PRINT"INPUT=";F$;" , PROD.1=";P$;" , PROD.2=";Q$
```

### RUN 1-ПОЕДИНИЧНИ КЛАСИ

```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

425      3.60      2.40      13.30      88.99      3.81      2.32      12.89
355      3.20      2.00      13.40      89.47      3.45      1.92      12.78
300      3.90      2.10      11.10      80.00      3.52      2.20      11.54
250      3.50      2.10      10.40      83.13      3.34      2.15      10.60
212      5.50      3.40      18.70      86.27      5.54      3.39      18.63
180      5.30      3.30      12.90      79.17      4.84      3.45      13.28
150      6.60      5.90      12.90      90.00      6.77      5.78      12.81
125      7.90      8.00      7.10      88.89      7.88      8.01      7.10
106      10.20     11.00     0.10      92.66      9.80      11.40     0.10
-106     50.30     59.80     0.10      84.09     50.82     59.17     0.10

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS  85.87%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW
Press any key to continue
```

### RUN 2 – КУМУЛАТИВНИ КЛАСИ

```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

425      3.60      2.40      13.30      88.99      3.77      2.33      12.98
355      6.80      4.40      26.70      89.24      7.18      4.26      25.90
300     10.70      6.50      37.80      86.58     10.72      6.49      37.77
250     14.20      8.60      48.20      85.86     14.03      8.65      48.46
212     19.70     12.00      66.90      85.97     19.51     12.06      67.20
180     25.00     15.30      79.80      84.96     24.33     15.52      80.73
150     31.60     21.20      92.70      85.45     31.10     21.39      93.28
125     39.50     29.20      99.80      85.41     39.00     29.44     100.23
106     49.70     40.20      99.90      84.09     48.78     40.72     100.40
-106     50.30     59.80      0.10      84.09     51.00     58.95      0.10

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS  86.49%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW
Press any key to continue
```

**RUN 3 - ПОЕДИНЕЧНИ КЛАСИ (Индустриски податоци за дијаметри на отвори за  
песок  $d_p=100\text{mm}$  и  $d_p=110\text{mm}$ )**

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\BASIC2~1.200\qb11\QBASIC.EXE

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	19.00	32.00	0.20	59.12	18.85	32.25	0.20
417	7.70	13.50	0.50	55.38	7.88	13.18	0.50
295	11.30	18.00	2.00	58.13	11.31	17.99	2.00
208	12.30	14.50	8.90	60.71	12.21	14.57	8.92
147	5.50	4.90	7.30	75.00	5.76	4.78	7.11
104	6.50	4.50	9.30	58.33	6.50	4.50	9.30
74	5.70	2.20	9.80	53.95	5.49	2.22	10.05
-74	32.00	10.40	62.00	58.14	31.98	10.40	62.03

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 58.20%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue

C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\BASIC2~1.200\qb11\QBASIC.EXE

COMPONENT	INPUT	ACTUAL PROD.1	PROD.2	X	INPUT	ADJUSTED PROD.1	PROD.2
589	17.00	31.30	0.00	54.31	17.95	29.33	0.00
417	7.40	10.80	0.00	68.52	6.96	11.37	0.00
295	11.60	16.10	5.40	57.94	11.80	15.86	5.38
208	16.00	16.70	10.20	89.23	14.76	17.53	10.40
147	6.00	6.00	7.00	100.00	6.25	5.85	6.87
104	7.80	5.40	10.50	52.94	7.51	5.49	10.70
74	7.30	3.70	11.30	52.63	6.85	3.77	11.72
-74	26.90	10.00	55.60	62.94	27.36	9.96	54.83

X= UNDERFLOW/FEED AS %

BEST FIT VALUE OF UNDERFLOW/FEED IS 61.21%

INPUT=FEED, PROD.1=UNDERFLOW, PROD.2=OVERFLOW

Press any key to continue



**MINTEH – 4**

**CYCLONE – PROGRAM**

```
10REM HYDROCYCLONE CALCULATIONS BY KREBS-MULAR-JULL FORMULAE
20REM A.KRSTEV 3 JULY 2008
30PRINT:PRINTTAB(7);"HYDROCYCLONE CALCULATIONS"
40PRINTTAB(7);"*****"
50PRINT:PRINT:PRINT"A.Determination of cut-point (and"
60PRINT:"capacity) of standard cyclone of known":PRINT"diameter"
70PRINT:PRINT:PRINT"B. Determination of diameter of cyclone"
80PRINT"needed to give required cut-point"
90PRINT:PRINT:PRINT:INPUT"Input A, or B "A$
100PRINT:PRINT"INSERT FOLLOWING FEED DATA:"
110PRINT:PRINT:INPUT"S.G. of dry solids, kg/l  "S
120PRINT:PRINT"Feed % solids by weight"
130INPUT"(If only slurry density known, input 0)  "x
140 IF x<>0 THEN D=100*S/((100*S)+x-(x*S)):GOTO 170
150PRINT:PRINT:INPUT"Slurry density, kg/l  "D
160x=100*S*(D-1)/(D*(S-1))
170V=x*D/S
180PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"Input the cyclone feed pressure in kPa"
190PRINT"(1 psi=6.895 kPa). If, in the case of"
200PRINT"an operating cyclone (calculation A),"
210PRINT"the pressure is not known, input 0, and"
220PRINT"then input the volumetric flowrate. If"
230PRINT"this is not known, input 0, then input"
```

```
240PRINT"the mass flowrate of dry solids."

250PRINT:PRINT:PRINT:INPUT"Cyclone feed pressure, kPa  "P

260 IF P<>0 THEN 310

270PRINT:PRINT:INPUT"Feed flowrate, cu.m/h  "Q

280 IF Q<>0 THEN M=Q*D*x/100:GOTO 310

290PRINT:PRINT:INPUT"Feed mass flowrate, t/h  "M

300Q=100*M/(x*D)

310IF A$="B" THEN 450

320REM CALCULATIONS A

330PRINT:INPUT"Cyclone diameter, cms  "Dc

340 IF P=0 THEN 370

350Q=0.0094*(P^0.5)*Dc*Dc

360M=Q*D*x/100

370d50=0.77*(Dc^1.875)*EXP(-.301+ (.0945*V)-
(.00356*V*V)+(.0000684*V*V*V))/((Q^0.6)*((S-1)^0.5))

380PRINT:PRINT:GOSUB 520

390 GOSUB 580

400IFP<>0 THEN END

410P=(Q^2)/((.0094^2)*(Dc^4))

420P1=P/6.895

430PRINT"Cyclone pressure is ";P;"kPa"

440PRINT"          (";P1;"psi)":END

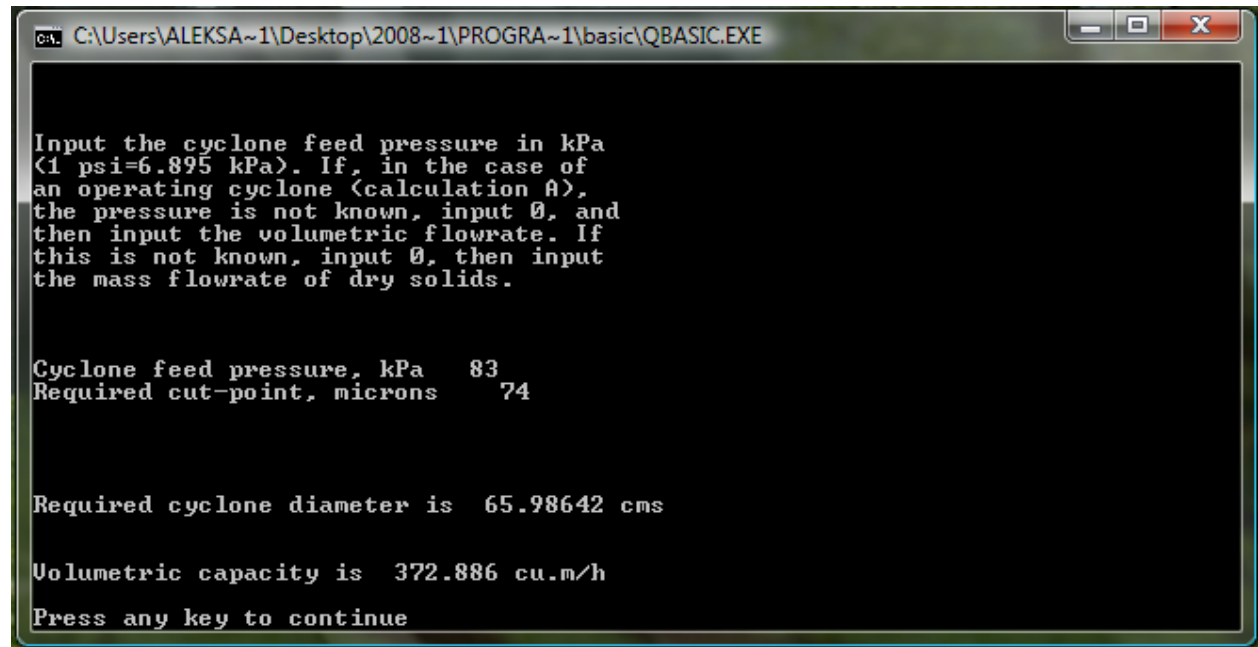
450 REM CALCULATIONS B

460INPUT"Required cut-point, microns  "d50

470Dc=(d50^1.481)*((S-1)^.741)*(.0094^.889)*(P^.444)/((.77^1.481)*(EXP(-.301+ (.0945*V)-
(.00356*V*V)+(.0000684*V*V*V))^1.481))
```

```
480Q=0.0094*(P^.5)*Dc*Dc
490M=Q*D*x/100
500PRINT:PRINT:PRINT:GOSUB 520
510 GOSUB 640:END
520 REM SUBROUTINE
530IF Q<1 THEN Q=Q*1000:B$="litres/h":GOTO 550
540B$="cu.m/h"
550IF M<1 THEN M=1000*M:C$="kg/h":GOTO 570
560C$="t/h"
570 RETURN
580 REM SUBROUTINE
590@%=131594: REM SETS 2 DECIMALS PLACES
600PRINT:PRINT"Cyclone cut-point is ";d50;"microns"
610PRINT:PRINT"Mass flowrate is ";M; C$
620PRINT:PRINT"Volumetric flowrate is ";Q; B$
630 RETURN
640 REM SUBROUTINE
650@%=131594: REM SETS 2 DECIMALS PLACES
660PRINT:PRINT"Required cyclone diameter is ";Dc; "cms"
670PRINT:PRINT:PRINT"Volumetric capacity is ";Q; B$
680 REM PRINT:PRINT:PRINT"Solids capacity is ";M; C$:RETURN
```

### RUN 1 – ОДРЕДУВАЊЕ НА ДИЈАМЕТАР НА ХИДРОЦИКЛОН



```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\PROGRA~1\basic\QBASIC.EXE

Input the cyclone feed pressure in kPa
<1 psi=6.895 kPa>. If, in the case of
an operating cyclone <calculation A>,
the pressure is not known, input 0, and
then input the volumetric flowrate. If
this is not known, input 0, then input
the mass flowrate of dry solids.

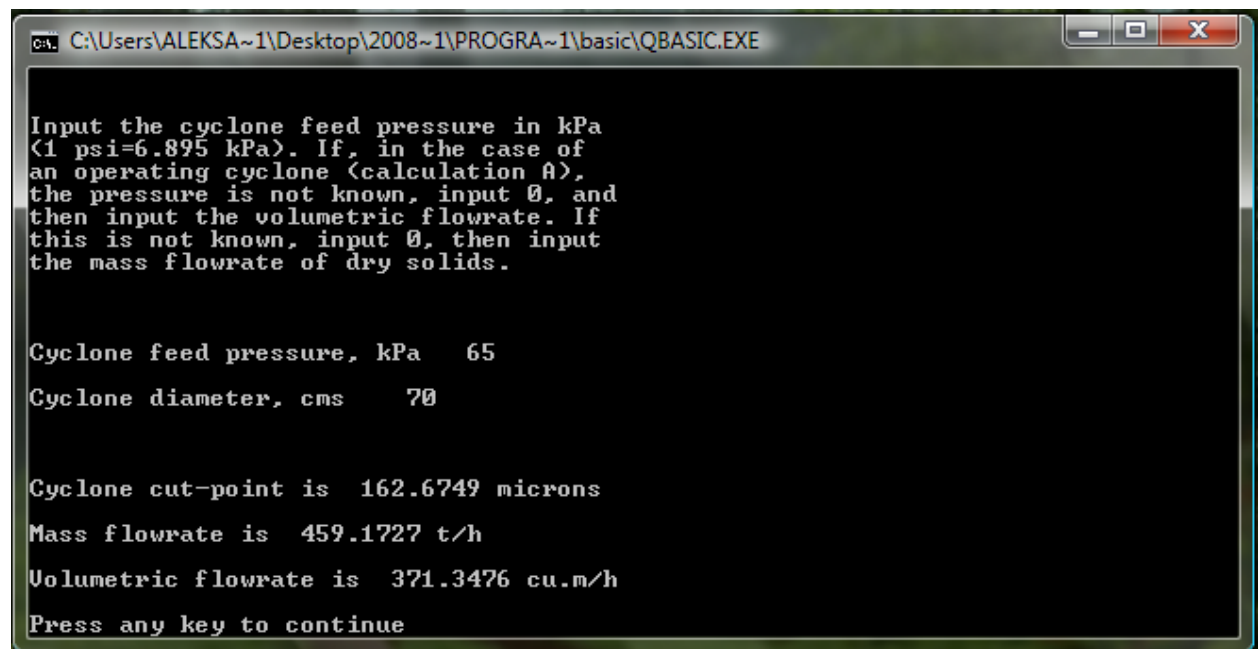
Cyclone feed pressure, kPa      83
Required cut-point, microns    74

Required cyclone diameter is  65.98642 cms

Volumetric capacity is  372.886 cu.m/h

Press any key to continue
```

### RUN 2 – ОДРЕДУВАЊЕ НА ДИЈАМЕТАР НА ГРАНИЧНО ЗРНО



```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\2008~1\PROGRA~1\basic\QBASIC.EXE

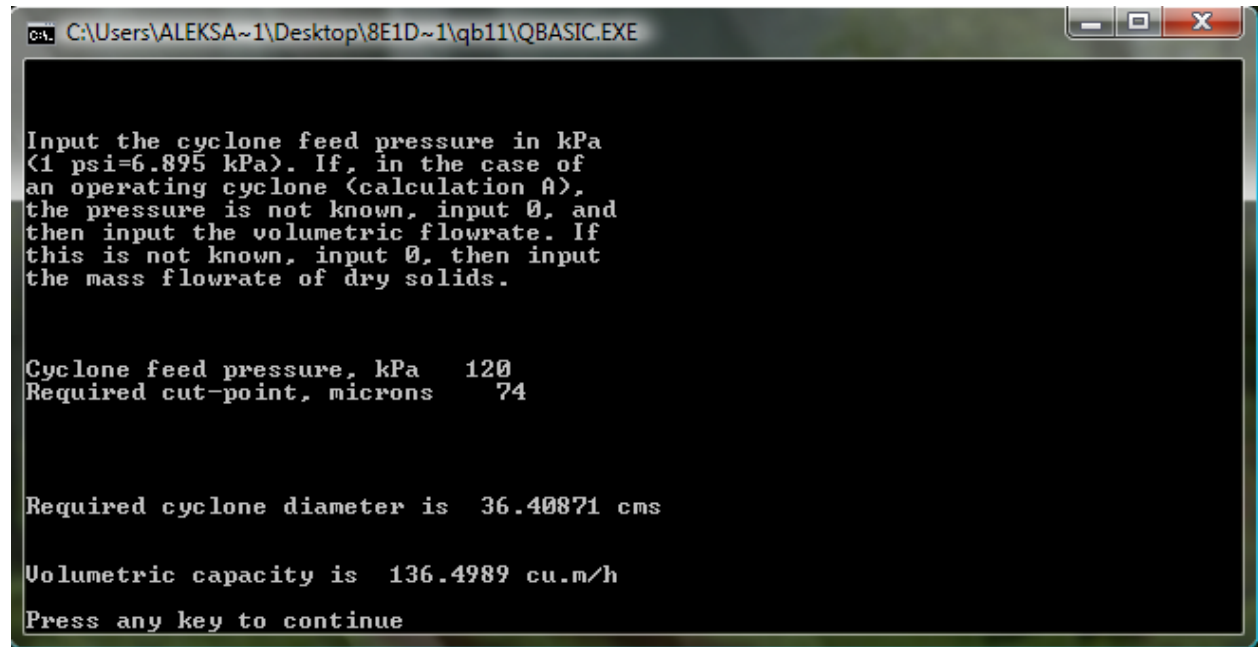
Input the cyclone feed pressure in kPa
<1 psi=6.895 kPa>. If, in the case of
an operating cyclone <calculation A>,
the pressure is not known, input 0, and
then input the volumetric flowrate. If
this is not known, input 0, then input
the mass flowrate of dry solids.

Cyclone feed pressure, kPa      65
Cyclone diameter, cms          70

Cyclone cut-point is  162.6749 microns
Mass flowrate is  459.1727 t/h
Volumetric flowrate is  371.3476 cu.m/h

Press any key to continue
```

### RUN 3 – ОДРЕДУВАЊЕ НА ДИЈАМЕТАР НА ХИДРОЦИКЛОН



```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

Input the cyclone feed pressure in kPa
<1 psi=6.895 kPa>. If, in the case of
an operating cyclone <calculation A>,
the pressure is not known, input 0, and
then input the volumetric flowrate. If
this is not known, input 0, then input
the mass flowrate of dry solids.

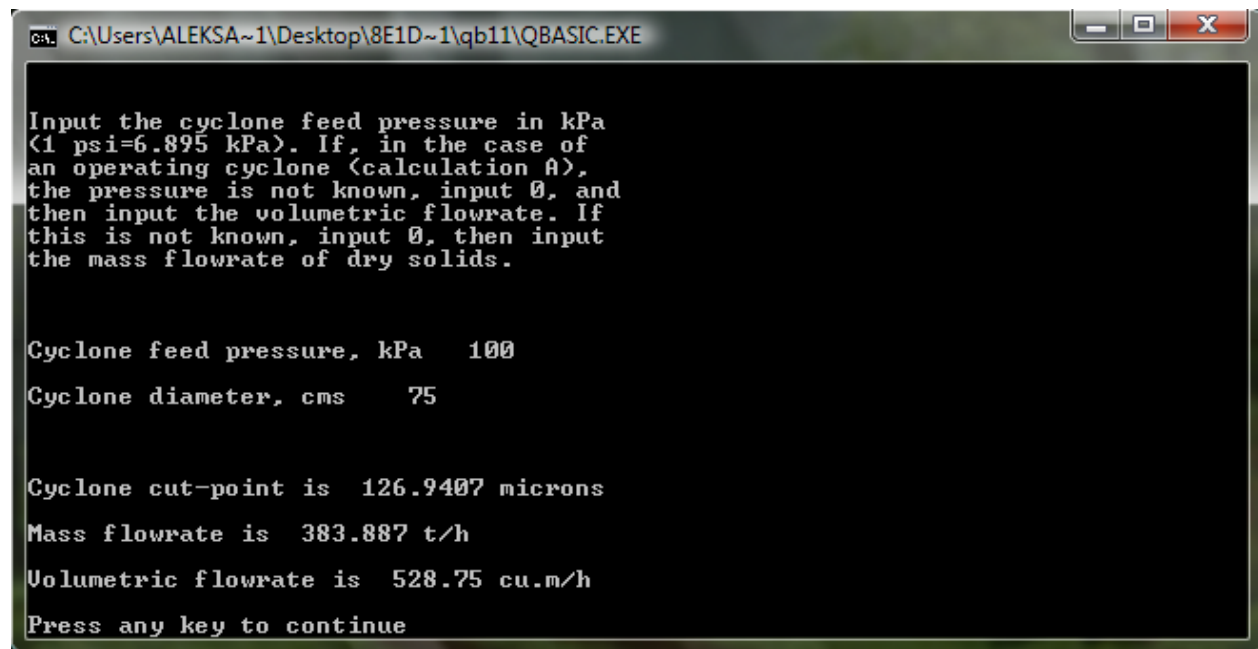
Cyclone feed pressure, kPa    120
Required cut-point, microns   74

Required cyclone diameter is  36.40871 cms

Volumetric capacity is  136.4989 cu.m/h

Press any key to continue
```

### RUN 4 – ОДРЕДУВАЊЕ НА ДИЈАМЕТАР НА ГРАНИЧНО ЗРНО



```
C:\Users\ALEKSA~1\Desktop\8E1D~1\qb11\QBASIC.EXE

Input the cyclone feed pressure in kPa
<1 psi=6.895 kPa>. If, in the case of
an operating cyclone <calculation A>,
the pressure is not known, input 0, and
then input the volumetric flowrate. If
this is not known, input 0, then input
the mass flowrate of dry solids.

Cyclone feed pressure, kPa    100
Cyclone diameter, cms        75

Cyclone cut-point is  126.9407 microns
Mass flowrate is  383.887 t/h
Volumetric flowrate is  528.75 cu.m/h

Press any key to continue
```

**MINTEN - 3**

Здробена руда 70 t/h со специфична маса од  $4,0 \text{ t/m}^3$  се води на мелење во затворен циклус со хидроциклон.

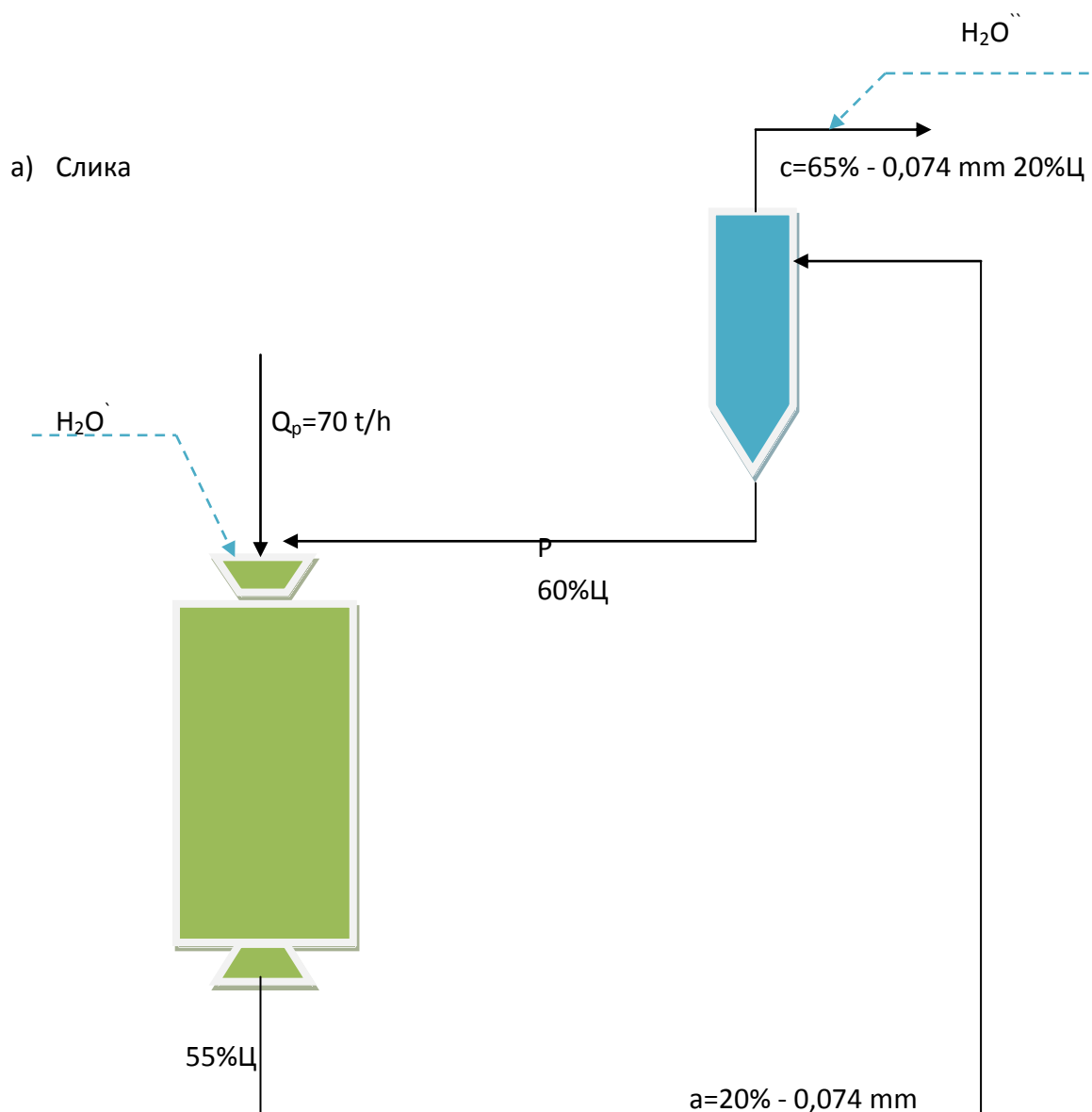
Ако се познати:

- $C=300\%$  - циркулациски товар на мелницата,
- $a=20\%$  - состав на  $-0,074\text{mm}$  класата во излезот од млин,
- $c=65\%$  - состав на  $-0,074\text{mm}$  класата во преливот од класификаторот (хидроциклонот)

Да се прикаже и пресмета:

- а) Шематски да се прикаже процесот на мелење-класирање,
- б) Да се пресмета производноста на мелницата,
- в) Колкава количина на вода треба да се додаде во мелницата за да составот на цврстата фаза биде 55%, додека составот на цврстата фаза во песокот од хидроциклонот е 60%.
- г) Колкава количина на вода треба да се додаде на преливот од хидроциклонот, за да составот на цврстата изнесува 20%,
- д) Колкава е производноста на хидроциклоните,
- е) Да се избере хидроциклон и одреди нивниот број,
- ж) Да се одреди дијаметарот на граничното зрно на класирање за избраниот хидроциклон,
- з) Да се одреди ефикасноста на класирање на избраниот хидроциклон,
- и) Шематски да се прикаже движењето на масите во процесот на мелење-класирање,
- п) Да се направи табеларен приказ за билансот на класирање во хидроциклонот.

**РЕШЕНИЕ:**



- b) Производноста на мелницата при познат циркулациски товар се пресметува на следниот начин:

$$Q_M = Q_p + P,$$

$$Q_p = 70,0t/h$$

$$C = \frac{P}{Q_p} \cdot 100 = 300\%$$

$$P = 3 \cdot Q_p = 3 \cdot 70 = 210t/h$$

$$Q_M = 70 + 210 = 280t/h$$

- с) Количината на пулпата од повратниот песок од хидроциклонот со 60% цврста фаза е:

$$\frac{100}{60} \cdot 210 = 350t/h$$

Количината на водата во пулпата од повратниот песок од хидроциклонот изнесува:

$$H_2O = 350 - P = 350 - 210 = 140t/h$$

Како е специфичната густина на водата  $1,0 t/m^3$ , имаме дека волуменот на водата е:

$$V_{H_2O} = \frac{140}{1} = 140m^3/h$$

Составот на цврстата фаза во влезот на мелницата би била:

$$X\% = \frac{100 \cdot 280}{140 + 280} = 66,6\%$$

За да имаме состав на цврста фаза од 55% во влезот од мелницата, потребно е да се додаде извесна количина на вода.

Количината на пулпата во тој случај би била:

$$\frac{100}{55} \cdot 280 = 509,0 t/h$$

Количината на водата во пулпата би била:

$$509,0 - 280,0 = 229,0 t/h$$

Односно, потребната количина на вода за 55% цврста фаза при мелењето е:

$$229,0 - 140,0 = 89,0 m^3/h$$



- d) Количината на пулпата во преливот на хидроциклонот со 20% цврста фаза ќе изнесува:

$$\frac{100}{20} \cdot 70 = 350,0 \text{ t/h}$$

Количината на водата во пулпата ќе изнесува:

$$350 - 70 = 280 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 280 \text{ m}^3/\text{h}$$

Потребната количина на вода за да се разрежи преливот од хидроциклонот до 20% цврста фаза е:

$$280 - 89 = 191 \text{ m}^3/\text{h}$$

- e) Производноста на хидроциклоните мора да го задоволат условот:

- 280,0 t/h цврста фаза, односно
- 509,0 m<sup>3</sup>/h пулпа

Како е специфичната маса на пулпата дадена со равенката:

$$\sigma = \frac{1}{1 - \frac{T(\gamma_r - 1)}{100 \cdot \gamma_r}}$$

Каде е:

- ✓ T% - составот на цврстата фаза во пулпата,
- ✓  $\gamma_r$  - специфичната маса на рудата, t/m<sup>3</sup>

За нашиот случај имаме:

$$\sigma = \frac{1}{1 - \frac{55(4 - 1)}{100 \cdot 4}} = 1,702 \text{ t/m}^3$$

Производноста на хидроциклоните ќе изнесува:

$$\frac{509,0}{1,702} = 299,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 4.963,4 \frac{\text{lit}}{\text{min}}$$

- f) Се избира следниот хидроциклон:

Производноста на хидроциклонот се пресметува по равенството:

$$Q_H = k \cdot d_p \cdot D \cdot \sqrt{H \cdot g}$$

Каде е:

$$k_0 = 5$$

$$k = \frac{k_0 \cdot d_B}{D} = \frac{5 \cdot 90}{700} = 0,64$$

$$Q_H = 0,64 \cdot 70 \cdot 14 \cdot 9,81 \cdot 0,98 = 1.944,3 \text{ lit/min}$$

Се усвојуваат 3 хидроциклони со дадените димензии.

- g) Граничниот дијаметар на зрното кое се класира во хидроциклоните се одредува со помош на следната равенка:

$$d_r = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d_p^2 \cdot \Pi_\Phi}{d_d \cdot \sqrt{H} \cdot (\gamma_p - 1)}}$$

$$d_r = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{70 \cdot 14^2 \cdot 55}{7 \cdot \sqrt{0,98} \cdot (4 - 1)}}$$

$$d_d = (0,2 - 0,7) \cdot d_p = 0,5 \cdot 14 = 7 \text{ cm}$$

$$d_p = 14 \text{ cm}$$

$$d_r = 0,153 \text{ mm}$$

- h) Ефикасноста на класирањето на хидроциклонот се пресметува по равенството:

$$E = \frac{\Pi_p \cdot (c - a)}{Q_M \cdot \frac{a}{100} (100 - a)} \cdot 100$$

$$E = T_{\Pi p} \cdot \frac{(c - a)}{(100 - a) \cdot a} \cdot 100$$

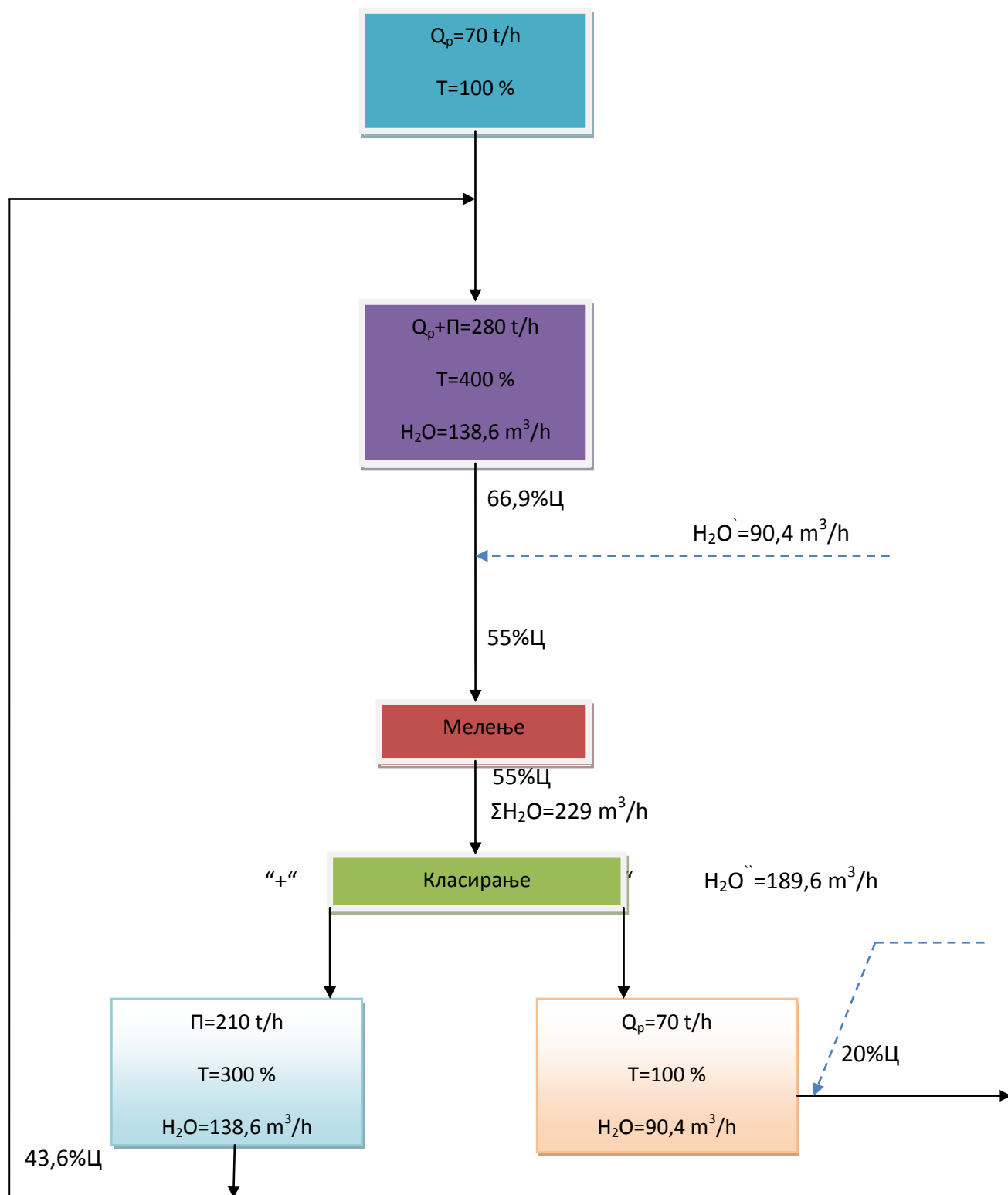
$$T_{\Pi p} = \frac{\Pi_p}{Q_M} \cdot 100 = \frac{70}{280} \cdot 100 = 25\%$$

$c=64\%$  -  $0,074 \text{ mm}$ , во преливот од хидроциклонот,

$a=20\%$  -  $0,074 \text{ mm}$ , во излезот од мелницата,

$$E = 25 \cdot \frac{(65 - 20)}{(100 - 20) \cdot 20} \cdot 100 = 68,875\%$$

i) Шематски приказ на движењето на масите во процесот на мелење-класирање:



Математичко моделирање, програмирање во затворени циклуси на  
Минералната технологија

---

j) Табеларен приказ за билансот на класирање во хидроциклонот:

	Т%	Маса на цврстото	Ц%	Пулпа	Спец. маса	Волумен на пулпата	
		t/h		t/h	t/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h	lit/min
ВЛЕЗ	100,0	280,0	55,0	509,0	1,702	299,0	4.963,4
ПРЕЛИВ	25,0	70,0	43,6	160,4	1,485	108,0	1.792,8
ПЕСОК	75,0	210,0	60,0	348,6	1,818	191,2	3.173,9



Minteh

Проблем    Решение а)    Решение б,в,г

Здробената руда (-5+0) се води на едностадијално мелење во мелница со челични топки со два класификатора, при што мелницата се храни со обата песока од класификаторите.  
Ако се познати процентуалните состојки на класата -0,15 мм:

а =  % ... во сомелениот производ од мелницата,  
б1 =  % ... во песокот од I класификатор,  
б2 =  % ... во песокот од II класификатор,

... и условот да количината на песокот од II класификатор е 5 пати поголема од количината на преливот на I класификатор, која се спојува со количината на преливот од II класификатор, да се прикаже и пресмета:

а.) - Шематски да се прикаже процесот на мелење,  
б.) - Да се пресмета циркулацискиот товар на мелницата,  
в.) - Да се пресмета производноста на мелницата,  
г.) - Да се пресмета процентуалниот состав на класата -0,150 мм во влезната руда

Q<sub>gr</sub> =  t/h

Пресметај

The screenshot shows a software window titled "Minteh" with three tabs: "Проблем", "Решение а)", and "Решение б,в,г". The "Решение б,в,г" tab is active, displaying a red background with white text. The results are organized into three sections: б.) Циркулациски товар на мелницата, в.) Производност на мелницата, and г.) Процентуален состав на класата -0,150 мм во влезната руда. Each section contains numerical values in input fields.

Section	Parameter	Value	Unit
б.) Циркулациски товар на мелницата	C=	152.78	%
в.) Производност на мелницата	P1=	153.85	t/h
	P2=	230.77	t/h
	Qm=	384.62	t/h
г.) Процентуален состав на класата -0,150 мм во влезната руда	Pr1=	46.15	t/h
	E=	26.92	%

**MINTEN - 2**

Здробена руда (-5+0) се води на едностадијално мелење во мелница со челични топки со два класификатора, при што мелницата се храни со обата песока од класификаторите.

Ако се познати процентуалните состави на класата -0,150 mm:

$a=45\%$  ... во сомелениот производ од мелницата,

$b_1=5\%$  ... во песокот од I класификатор,

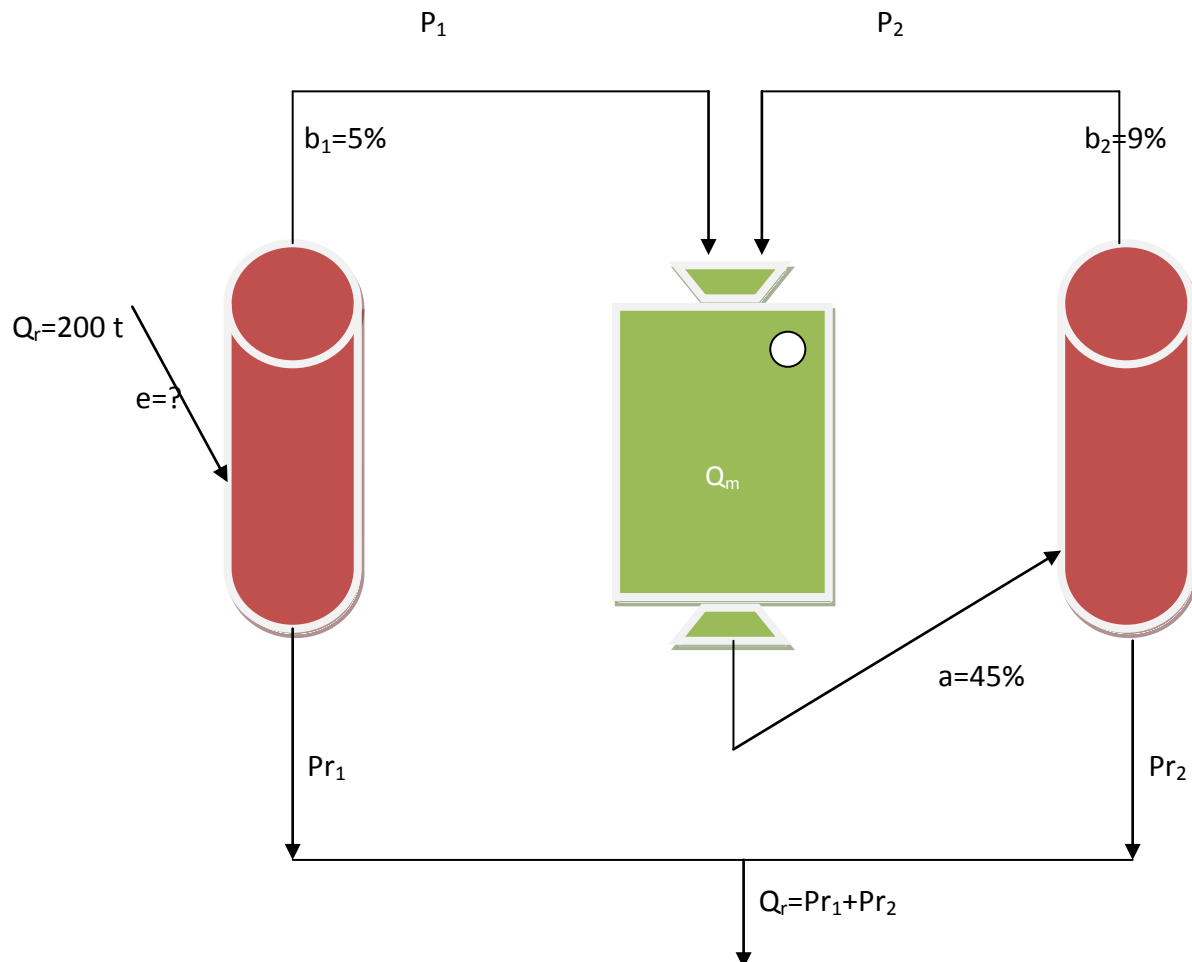
$b_2=9\%$  ... во песокот од II класификатор,

..... и условот да количината на песокот од II класификатор е 5 пати поголема од количината на преливот на I класификатор, која се спојува со количината на преливот од II класификатор, да се прикаже и пресмета:

- a) Шематски да се прикаже процесот на мелење,
- b) Да се пресмета циркулацискиот товар на мелницата,
- c) Да се пресмета производноста на мелницата,
- d) Да се пресмета процентуалниот состав на класата -0,150mm во влезната руда,  
 $Q_r=200 \text{ t/h}$ .

**РЕШЕНИЕ:**

а) Слика





b) Од условот:

$$\begin{aligned}Pr_2 &= P_1 \\(P_1 + P_2) \cdot a &= P_2 \cdot b_2 + P_1 \cdot 100 \\P_1(100 - a) &= P_2(a - b_2)\end{aligned}$$

Циркулацискиот товар на мелницата е:

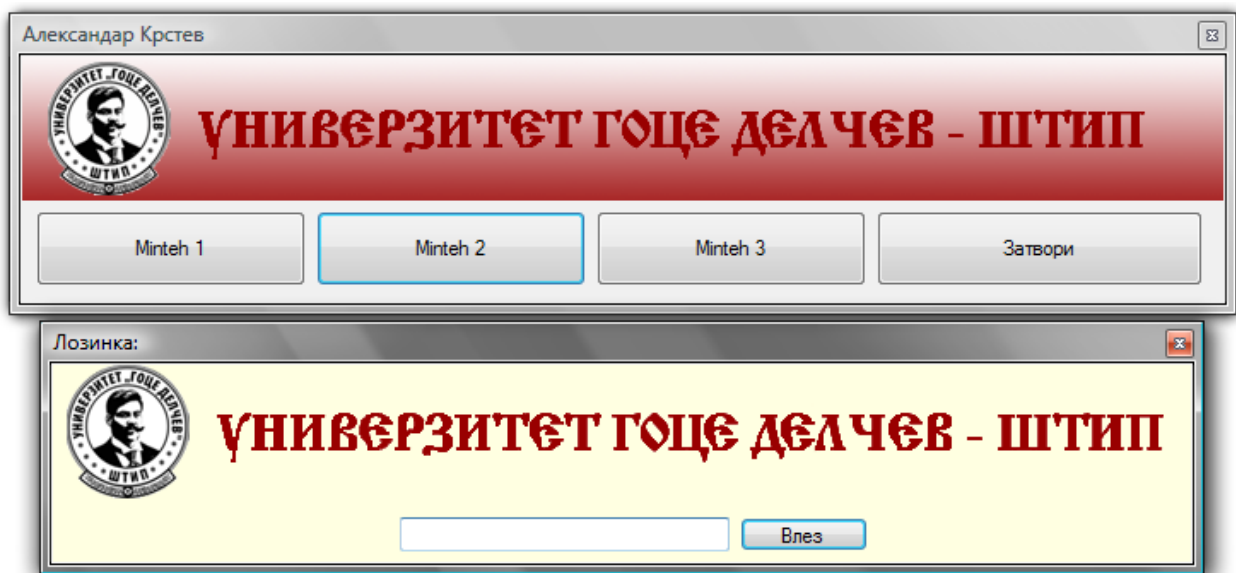
$$C = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{(100 - a)}{a - b_2} \cdot 100 = \frac{100 - 45}{45 - 9} \cdot 100 = 150\%$$

c) Производноста на мелницата ја одредуваме на овој начин:

$$\begin{aligned}Q_m &= P_1 + P_2 \\P_2 &= 1,5 \cdot P_1 \\Q_m &= 2,5 \cdot P_1 \\P_2 &= 5 \cdot Pr_1 = 5 \cdot (Q_r - Pr_2) = 5 \cdot (Q_r - P_1) \\1,5 \cdot P_1 &= 5 \cdot Q_r - 5 \cdot P_1 \\6,5 \cdot P_1 &= 5 \cdot Q_r \\Q_r &= \frac{6,5}{5} \cdot P_1 = 1,3 \cdot P_1 \\P_1 &= \frac{Q_r}{1,3} = \frac{200}{1,3} = 153,85 \frac{t}{h} \\P_2 &= 1,5 \cdot P_1 = 1,5 \cdot 153,85 = 230,70 \frac{t}{h} \\Q_m &= P_1 + P_2 = 153,85 + 230,70 = 384,55 \frac{t}{h}\end{aligned}$$

d) Процентуалниот состав на “-” класата во влезната руда:

$$\begin{aligned}Q_r \cdot e &= P_1 \cdot b_1 + Pr_1 \cdot 100 \\Pr_1 &= \frac{P_2}{5} = \frac{230,70}{5} = 46,14 \frac{t}{h} \\e &= \frac{Pr_1 \cdot 100 + P_1 \cdot b_1}{Q_r} = \frac{230,70 \cdot 5 + 46,14 \cdot 100}{200} = 28,8 \%\end{aligned}$$



Мелење и класирање

Процес Решение

Здробена руда  t/h со специфична маса  t/m<sup>3</sup> се води на мелење во затворен циклус со хидроциклон.

Ако се познати:

C=  % циркулациски товар на мелницата

a=  % состав на класата во излезот од млин

c=  % состав на класата во преливот од хидроциклонот

Да се пресмета:

а) Шематски да се прикаже процесот на мелење - класирање.

б) Да се пресмета производноста на мелницата.

в) Колкава количина на вода треба да се додаде во мелницата за да составот на цврстата фаза биде  % додека составот на цврстата фаза во песокот од хидроциклонот е  %

г) Колкава количина на вода треба да се додаде на преливот во хидроциклонот, за да составот на цврстата фаза е  %

д) Колкава е производноста на хидроциклоните

ѓ) Да се избере хидроциклон и одреди нивниот број

е) Да се одреди дијаметарот на граничното зрно на класирањето за избраниот хидроциклон

ж) Да се одреди ефикасноста на класирање за избраниот хидроциклон

Други променливи

T= <input type="text" value="55"/> %	D= <input type="text" value="70"/> cm	R= <input type="text" value="70"/>
dp= <input type="text" value="14"/>	H= <input type="text" value="0.98"/> bar	k0= <input type="text" value="5"/>
db= <input type="text" value="90"/>	g= <input type="text" value="9.81"/> m/s <sup>2</sup>	

Пресметај

Мелење и класирање

Процес Решение

б) Производноста на мелницата е  t/h

в) Количина на пулпа од повратен песок од хидроциклонот во цврста фаза е:  t/h

Количина на вода во пулпа од повратен песок од хидроциклон е:  t/h

Волумен на вода:  m<sup>3</sup>/h

Состав на цврста фаза во влезот на мелницата е:  %

Количина на пулпа  t/h

Количина на вода во пулпата  t/h

Потребна количина на вода за цврстата фаза при мелењето:  t/h

г) Количина на пулпа во преливот на хидроциклонот е  t/h

Количина на вода во пулпата  m<sup>3</sup>/h

Потребна количина на вода за да се разрежи преливот на хидроциклонот  m<sup>3</sup>/h

д) Производност на хидроциклон  m<sup>3</sup>/h

Специфична маса на пулпата:  t/m<sup>3</sup>

ѓ) Избор на хидроциклон

Производност на избраниот хидроциклон  m<sup>3</sup>/h

е) Граничен дијаметар на зрното  mm

ж) Ефикасност на класирање на хидроциклонот  %

### **MINTEN - 1**

Здробена руда со специфична маса од  $2,7 \text{ t/m}^3$  и количина од  $50 \text{ t/h}$ , се доведува на двостадиско мелење со комбинирано класирање на механички класификатор и хидроциклон.

Секундарната мелница се храни со песоците од механичкиот класификатор и хидроциклонот и работи во затворен циклус со хидроциклонот.

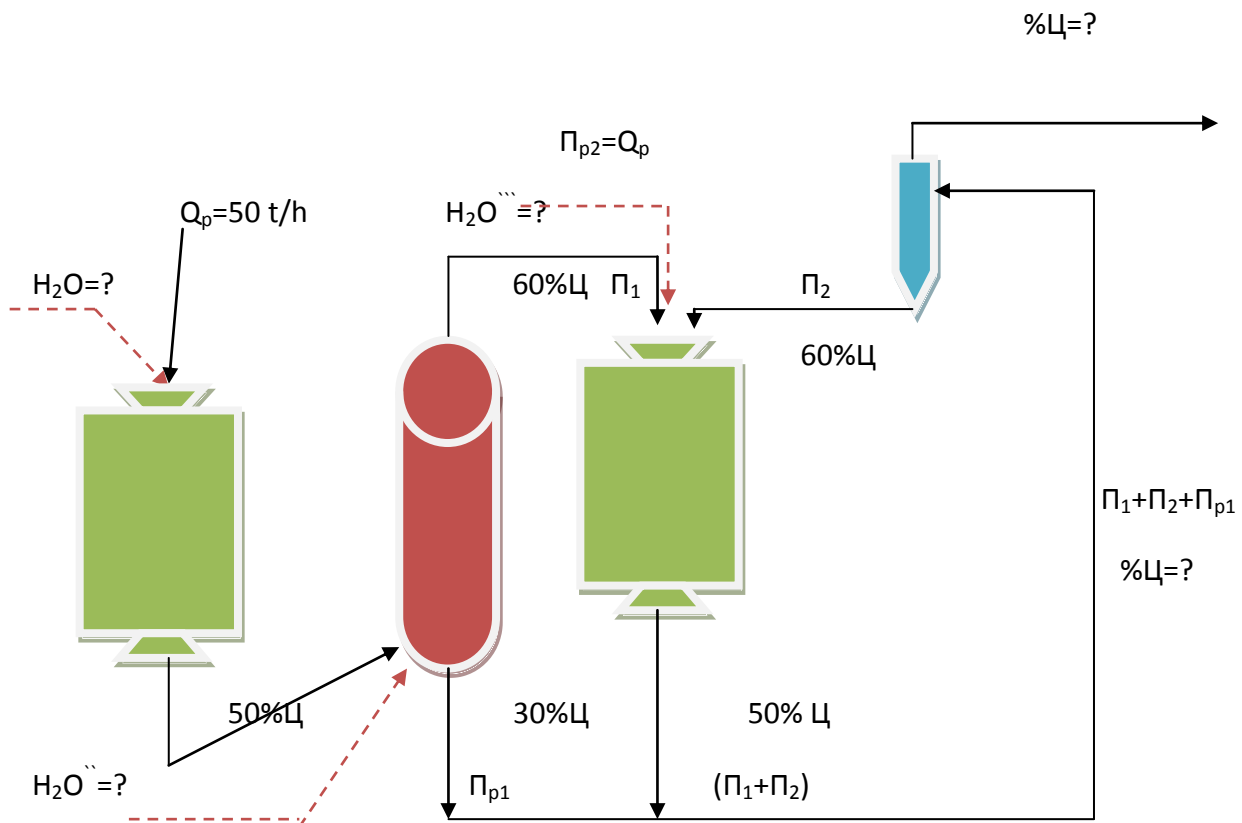
Пулпата што влегува под притисок во хидроциклонот се состои од преливот на механичкиот класификатор и мливот од секундарната мелница. Циркулацискиот товар на секундарната мелница изнесува  $C=300\%$ .

Количината на песокот (со содржина  $60\%$  цврсто) од механичкиот класификатор е 2 пати поголема од количината на преливот во истиот.

**Да се прикаже и пресмета:**

1. Шематски да се прикаже процесот на мелење-класирање,
2. Колкава количина на вода е потребно да се воведе, за да примарното мелење се одвива при  $50\%$  цврсто?
3. Колкава количина на вода треба да се додаде на пулпата за преливот од механичкиот класификатор, за да содржината на цврстата фаза изнесува  $30\%$ ?
4. Колкава количина на вода треба да се додаде во секундарната мелница, за да мелењето се изведува при  $50\%$  цврсто?
5. Да се пресмета производноста на секундарната мелница по цврста фаза.
6. Колкав е составот на цврстата фаза во пулпата пред влезот од хидроциклонот?
7. Колкав е составот на цврстата фаза во преливот од хидроциклонот?
8. Колкава е специфичната маса на пулпата во влезот, преливот и песокот од хидроциклонот?
9. Колкава е вкупната количина на вода, која треба да се воведе во процесот на мелење со комбинирано класирање?
10. Шематски да се прикаже движењето на масите во процесот на мелење-комбинирано класирање.

**Решение:**



Количината на пулпата при 50% цврста фаза е:

$$\frac{100}{50} \cdot 50,0 = 100,0 \text{ t/h}$$

Количината на водата за 50% цврста фаза ќе изнесува:

$$100,0 - 50,0 = 50,0 \text{ t/h } H_2O \quad \text{односно } H_2O = 50,0 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Количината на водата во преливот од механичкиот класификатор изнесува:

$$H_2O_{\text{ПР}_1} = 50,0 - 22,0 = 28,0 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Бидејќи количината на вода во песокот од механичкиот класификатор изнесува:

$$\begin{aligned}\frac{100}{60} \cdot \Pi_1 &= x \\ \Pi_1 &= 2 \cdot \Pi_{P1} \\ P &= \Pi_1 + \Pi_{P1} = 2 \cdot \Pi_{P1} + \Pi_{P1} = 3 \cdot \Pi_{P1} \\ \Pi_{P1} &= \frac{P}{3} = \frac{50}{3} = 16,6t/h \\ \Pi_1 &= 33,4t/h \\ \frac{100}{60} \cdot 33,4 &= 55,4t/h \\ H_2O_{\Pi_1} &= 55,4 - 33,4 = 22,0m^3/h\end{aligned}$$

Составот на цврстата фаза по класирањето во преливот е:

$$\begin{aligned}\frac{100}{y} \cdot 16,6 &= 44,6 \quad \text{цврсто,} \\ y &= 37,2\%\end{aligned}$$

Количината на вода која треба да се додаде за да преливот има 30% цврсто е следната:

$$\begin{aligned}\frac{100}{30} \cdot 16,6 &= 55,1t/h \\ H_2O'' &= 55,1 - 44,6 = 10,5m^3/hH_2O\end{aligned}$$

Количината на цврста маса во песокот од хидроциклонот изнесува:

$$\begin{aligned}C &= \frac{\Pi_2}{\Pi_1} \cdot 100 = 300\% \\ \Pi_2 &= 3 \cdot \Pi_1 = 3 \cdot 33,4 = 100,2t/h\end{aligned}$$

Количината на пулпата во песокот  $\Pi_2$  е:

$$\frac{100}{60} \cdot 100,2 = 166,3t/h$$

Количината на водата во песокот од хидроциклонот:

$$H_2O_{\Pi_2} = 166,3 - 100,2 = 66,1m^3/h$$

Количината на вода во секундарната мелница:

$$H_2O_{M_{II}} = H_2O_{\Pi_2} + H_2O_{\Pi_1} = 66,1 + 22,0 = 88,1 m^3 / h$$

Количината на цврстата фаза која се воведува во секундарната мелница е :

$$C_{\Pi_1} + C_{\Pi_2} = 33,4 + 100,2 = 133,6 t / h$$

Составот на цврстата фаза пред секундарната мелница:

$$\frac{100}{x} \cdot 133,6 = (133,6 + 88,1) = 221,7 t / h$$
$$x\% = 60,2\%$$

Количината на вода да во секундарното мелење која треба да се додаде за да имаме 50% цврсто, наместо 60,2% е:

$$\frac{100}{50} \cdot 133,6 = 267,2 t / h$$
$$H_2O = 267,2 - 88,1 = 179,1 t / h = 179,1 m^3 / h$$

Како имаме вода од повратните песоци  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , потребно е да се воведе следната количина на вода:

$$H_2O'' = 133,6 - 88,1 = 45,5 m^3 / h$$

Производноста на секундарната мелница по цврстата фаза се пресметува на следниот начин:

$$\otimes_{M_{II}} = \Pi_1 + \Pi_2 = \Pi_1 + 3 \cdot \Pi_1 = 4 \cdot \Pi_1$$
$$\otimes_{M_{II}} = 4 \cdot 33,4 = 133,6 t / h$$

Количината на цврстата фаза што влегува во хидроциклонот е:

$$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_{p_1} = 33,4 + 100,2 + 16,6 = 150,2 t / h$$

Количината на вода што влегува во хидроциклонот е:

$$H_2O_{\Pi_{p_1}} + H_2O_{\otimes_{M_{II}}} = 38,5 + 133,6 = 172,1 m^3 / h$$



## Математичко моделирање, програмирање во затворени циклуси на Минералната технологија

Составот на цврстата фаза во пулпата пред влезот во хидроциклонот изнесува:

$$\frac{100}{J} \cdot 150,2 = (150,2 + 172,1) = 322,3t/h$$
$$J\% = 47,8\%$$

Составот на цврстата фаза во пулпата од преливот може да се изведе од следната табела на билансот на класирање во хидроциклонот:

	T%	Цврсто т/ч	Ц%	Пулпа т/ч
Влез	100,0	150,2	47,8	322,3
Прелив	33,4	50,0	X	156,0
Песок	66,6	100,2	60,0	166,3

$$\frac{100}{x} \cdot 50,0 = 156,0t/h$$
$$x = 32,0\%$$

Специфичната маса на пулпата во влезот од хидроциклонот:

$$\delta_B = \frac{1}{1 - \frac{47,8 \cdot (2,7 - 1)}{100 \cdot 2,7}}$$
$$\delta_B = 1,428t/m^3$$

Специфичната маса на пулпата во песокот од хидроциклонот:

$$\delta_{\Pi_2} = \frac{1}{1 - \frac{60 \cdot (2,7 - 1)}{100 \cdot 2,7}}$$
$$\delta_{\Pi_2} = 1,605t/m^3$$

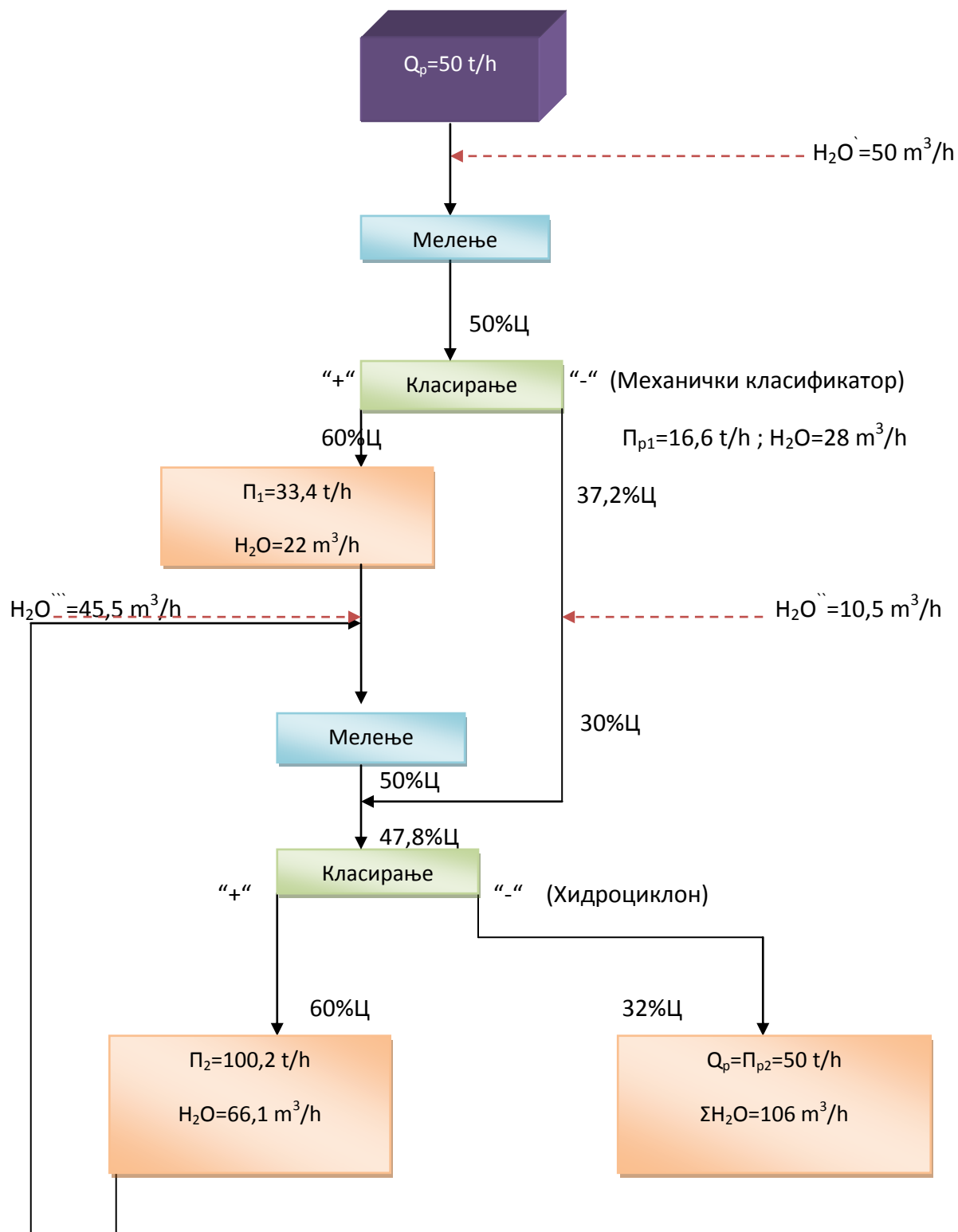
Специфичната маса на преливот од хидроциклонот:

$$\delta_{\Pi_{P_2}} = \frac{1}{1 - \frac{32 \cdot (2,7 - 1)}{100 \cdot 2,7}}$$
$$\delta_{\Pi_{P_2}} = 1,250 t / m^3$$

Вкупната количина на вода, која се воведува во процесот на мелење-класирање изнесува:

$$\sum H_2O = H_2O' + H_2O'' + H_2O''' = 50,0 + 10,5 + 45,5 = 106,0 m^3 / h$$

**Шематски приказ на движењето на масите во процесот мелење-класирање:**



Приказ на програмот во Visual studio 2005 за двостадисјално мелење со  
комбинирано класирање на механички класификатор и хидроциклон:

ФРГП

Лозинка

Влезни параметри

y= 2.7 t/m<sup>3</sup> a= 50 %

P= 50 t/h b= 30 %

C= 300 % c= 60 %

Пресметај

Количина на пулпа 100 t/h	Кол. на пулпата во песок на вода 166.6667 t/h	Количина на CF во HID 150 t/h
Количина на вода во прелив во мк 27.78 m <sup>3</sup> /h	Количина на вода во песокот од HID 66.66667 m <sup>3</sup> /h	Количина на вода во HID 177.78 m <sup>3</sup> /h
Количина на вода 50 m <sup>3</sup> /h	Количина на вода во SM 88.88667 m <sup>3</sup> /h	Состав на CF во пулпата пред HID 45.7624 %
Количина на вода во песок во мк 22.22 m <sup>3</sup> /h	Количина на CF во SM 133.3333 t/h	Состав на CF во пулпата од преливот 32.05128 %
Состав на CF по класирање 37.36921 m <sup>3</sup> /h	Состав на CF пред SM 60.0006 %	Спец. маса на пулпата во влезот од HID 1.787869 t/m <sup>3</sup>
Количина на вода која треба да се донесе 10.95556 t/h	Количина на вода во секундарно мелење 44.44666 m <sup>3</sup> /h	Спец. маса на пулпата во песокот од HID 2.368421 t/m <sup>3</sup>
Кол. на SM во песок од HID 100 t/h	Производност на SM по CF 133.3333 t/h	Спец. маса на преливот од HID 1.446429 t/m <sup>3</sup>
		Вкупна количина на вода 105.4022 m <sup>3</sup> /h

**Ознаки во програмот:**

***y***-специфична маса

***P***-количина на здробена руда

***C***-циркулациски товар на секундарната мелница

***a***-цврстоќа при примарно мелење

***b***-содржина на цврста фаза во механичкиот класификатор

***c***-количина на песок

***mk***-механички класификатор

***CF***-цврста фаза

***CM***-цврста маса

***HID***-хидроциклон

***SM***-секундарна мелница

### **ЗАКЛУЧОК**

Во современата минерална технологија се почесто се оди кон примена на програмски пакети и симулација на постојните процеси со цел да се овозможи прв чекор кон оптимизација, како и евентуална автоматизација на технолошките процеси.

Информациите за повеќето циклуси во минералната технологија, како што се технолошките показатели за масено искористување, искористување или ефикасност, односно големините на параметрите во симулациските модели од процесните единици во циклусот, изискуваат информации за количините или содржините за влезните или излезните параметри во затворениот циклус. Во повеќето циклуси мерењата се извршуваат на влезот во процесот или циклусот, односно на излезот на произведените продукти или пак од прилика во прилика во меѓуинтервалните продукти. Големините на преостанатите параметри се пресметуваат или изведуваат од другите измерени карактеристики, такви како што се распределбата по содржини или крупност на пробите собрани или земени во соодветни точки на циклусот. Истражувањето на ефикасноста на циклусот со примена на математичка симулација вклучува:

- Пресметка на целосниот материјален биланс на циклусот од некомплетните податоци во постројката;
- Пресметка на моделните параметри од комплетната мрежа на податоци во постројката;
- Симулација на циклусот на персонален компјутер проследен со оптимирачки алатки;
- Искористување на персонален компјутер за готови изработени, разработени или адаптирани компјутерски програми за пресметки, како и искористување на разни програмски јазици за нивна имплементација, како што се Basic, Excel, Video Studio и слично.
- При пресметката на моделните параметри се користат општите методи на најмали квадрати, линеарна регресија, матрична алгебра, пресметка на точноста, корекција или подесување со Lagrange множители или слично.

Се работи за примена и разработка на повеќе програми кои помагаат наместо макотрпни пресметки и добивање на голем број на податоци, со помош на математички операции во програмските пакети да се распределат или подесат (корегираат) грешките, така да наједноставно е подесувањето да се претстави како метод, дека измерените грешки се пропорционални на компонентните вредности во секоја мерна точка.

Методот на најмали квадрати исто така може да се користи да ги распредели грешките, за да ја минимизираат сумата на квадратите на подесувања од измерените вредности на најдобро подесените податоци.

Во конкретниот случај се разработени компјутерски програми **LAGRAN**, **WEGHTRE**, **WILMAN**, а програмите користат Basic поддршка која едноставно може да се трансформира во посовремен пакет на програмски јазик. Овие програмски разработени и адаптирани за примена можат да се сретнат во повеќе варијанти или разни дизајни, но всушност сите се однесуваат за подесување и корекција на преголемиот број на податоци кои се добиваат при експерименталните истражувања, а истите со математички операции со примена на компјутерските програми се дотеруваат или корегираат.

Всушност, **LAGRAN** (Reconciliation of excass data by non-weighted least squares), односно подесување или корекција на преголем број на податоци без користење или мерење на сумата на најмали квадрати, **WEGHTRE** (Reconciliation of excass data by weighted least squares) односно подесување или корекција на преголем број на податоци со користење или мерење на сумата на најмали квадрати, или **WILMAN** (Reconciliation of excass data by variances in mass equation), односно подесување или корекција на преголем број на податоци со промени во масените равенки, се програми кој потпомагаат во макотрпните пресметки кога се работи за процеси кои продуцираат два производи, а подесувањето на податоците од тие производи е цел на математичките операции за минимизација на направените грешки кои се појавуваат при мерење на преголем број на испитувања.

Примената на компјутерскиот програм **CYCLONE** придонесува кон ефикасна презентација на одредување на одделни битни карактеристики на хидроциклоните, како што се ефикасното одредување на дијаметарот на граничното зрно, дијаметар на хидроциклонот или друг податок за кој сме заинтересирани да го програмираме, како на пример дијаметар на отворот за песок или дијаметарот за отворот на преливот, потребен притисок за добивање соодветно гранично зрно или слично.

Програмот за едноставен затворен циклус на мелење-класирање **MINTEN - 3** (мелница – хидроциклон) е направен во Visual studio 2008 и овозможува брзо и ефикасно решавање на проблемот, при што операторот на програмот ефикасно задава соодветни влезни податоци или ги променува истите, а програмата отчитува резултати на апликативните прозорци, така се можни реални избори на влезни податоци кои ќе придонесат за оптимални резултати.

Програмот за затворен циклус на едностадијално мелење – двостадијално мелење **MINTEN - 2** во спирални класификатори е направен во Visual studio 2008 и овозможува

брзо и ефикасно решавање на проблемот, со истата гореспомната можност за варијација на влезни и излезни параметри.

Програмите за двостадиијално мелење со комбинирано класирање на механички класификатор и хидроциклон **MINTEH - 1** е направен во Visual studio 2008 и овозможува брзо и ефикасно решавање на проблемот поставен со проектната задача и дава можности за имплементирање и програмирање на слични или посложени проблеми кои се појавуваат во индустриската пракса на Минералната технологија.



### Литература

1. Apling, A. C., *et al.*, Hydrocyclone models in an ore grinding context, in *Hydrocyclones* (ed. G. Priestley and H. S. Stephens), BHRA Fluid Engineering, Cranfield (1980);
2. Anon., *The Sizing of Hydrocyclones*, Krebs Engineers, California (1977);
3. Austin, L. G., "A Review Introduction to the Mathematical Description of Grinding as a Rate Process" *Powder Technology*, pp 1-27, 1972;
4. Bradley, D., *The Hydrocyclone*, Pergamon Press, Oxford, 1965;
5. Behrens, S., Single Particle Breakage Test. A review of Principles and Applications Comminution Modelling, *Bull. Proc. Australs. Inst. Min. Met.*, Vol. 29, No 4, June, 1986;
6. Conway, T. M., A computer program for the prediction of hydrocyclone performance, parameters, and product-size distributions, *Mintek Report No. M233*, Randburg, South Africa (Dec. 1985);
7. Dahlstrom, D. A., Fundamentals and applications of the liquid cyclone, *Chem. Engng Prog. Symp. Series No. 15*, **50**, 41 (1954);
8. Deusic, S., Uticaj gustine pulpe i velicine otvora za pesak na rad hidrociklona I korelaciskih odnosi u laboratoriskim I industriskim uslovima rada sa rudom bakra lezista Bucim, *Doktorska disertacija*, Beograd (1989);
9. Edmiston, K. J., International guide to hydrocyclones, *World Mining* 36,61 (April 1983);
10. Evgun L., Ekmekci Z., Gülsoy Ö., Benzur H., Modelling and Simulation of Grinding Circuit in Magneuli Copper Concentrator., *Physicochemical Problems in Mineral Proceeding*, 38(2004), 231-240, USA, 2004;
11. Goldfarb, D., "Conjugate Gradient Method for Nonlinear Programming Problems With Linear Constraints" *I. and E. C. Fund. Val.* 23, No. 1, pp 112-147, 1988;
12. Голомеова, М. Докторска дисертација (Оптимизација на класирањето на бакарната руда од рудникот „Бучим“ во услови на повеќе факторска зависност) –Штип 2001;
13. Grujic, M. Optimizacija I Matematicko Modeliranje Procesa Usitnjavanja I Flotacijske Koncentracije –Bor 1991;
14. Grujic, M. et al. : Optimisation of Grinding Media Kinetics In the Ball Mill AIME – Meeting 1990, Salt Lake City, Utah, 1990;
15. Grujic, M., "Mathematical Modeling in Mineral Processing". SME Meeting Las Vegas, 1989;
16. Herbst, J. A., (1982) The Application of Modern Control Theory to Mineral Processing Operations *Proceedings 12<sup>th</sup> CMMI Congress*. H. W. Glen, Editor, South Africa Inst. Min. Metall., Johannesburg, 779-823;

17. Kawatra S. K., Eisele T. C., Weldum T., Lavsén D., Mariani R., Pletka J., Optimization of Comminution Circuit Through put and Product Size Distribution by Simulation and Control., MTU, Michigan, USA, 2005;
18. Kawatra S. K., Eisele T. C., Welgui H. J., Optimization of Comminution Circuit Through put and Product Size Distribution by Simulation and Control., MTU, Michigan, USA, 2004;
19. Kawatra, S. K., and Seitz, R. A., Calculating the particle size distribution in a hydrocyclone product for simulation purposes, *Minerals and Metallurgical Processing*, 2, 152 (Aug. 1985);
20. Крстев, Б. Минерално Инженерство –Штип 2002;
21. Крстев, Б. Минерална Технологија 1 –Штип 2002;
22. Крстев, Б. Голомеов, Б. Зборник на Трудови (Примена на компјутерски програми за одредување на технолошки показатели во ПМС- стручен труд) –Рударско – Геолошки Факултет, Штип 1994;
23. Lynch, A. J. Mineral Crushing and Grinding Circuits (Their Simulation, Optimisation, Design and Control) –1977;
24. Lynch, A. J., Rao, T. C., and Prisdrey, K. A., The influence of hydrocyclone diameter on reduced efficiency curves, *Int. J. Min. Proc.* 1, 173 (May 1974);
25. Lynch, A. J., Rao, T. C., and Bailey, C. W., The influence of design and operating variables on the capacities of hydrocyclone classifiers, *Int. J. Proc.* 2, 29 (Mar. 1975);
26. Magdalinovic, N. Usitnjavanje I Klasiranje –Beograd 1999;
27. Magdalinovic, N., Usitnjavanje I klasiranje mineralnih sirovina., Naucna knjiga, Beograd (1991);
28. Magdalinovic, N., Markovic Z., Jankovic A., Ignjatovic M., Djuric J., The Optimization of the Ball Grain Size Distribution in Ball Mill., 4<sup>th</sup> IC Kosice (1994), 66;
29. Mular, A. L., and Jull, N. A., The selection of cyclone classifiers, pumps and pump boxes for grinding circuits, in *Mineral Processing Plant Design*, AIMME, New York, (1978);
30. Mular, A. L., (1972) Empirical modeling and aptinuation of mineral processes, *Mineral Science and Engineering*, 4, No 3. Pp 30-42;
31. Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., and Kojovic, T., 1996. *Mineral comminution circuits: their operation and optimization*. JKMRC., pp. 413;
32. Plitt, L. R., A mathematical model of the hydrocyclone classifier, *CIM Bull.* 69, 114 (Dec. 1976);
33. Povarov A. I., Gridrocikloni na obogatitel'nyh fabrikah., "Nedra". Moskva (1978)
34. Renner, V. G., and Cohen, H. E., Measurement and interpretation of size distribution of particles within a hydrocyclone, *Trans. IMM.*, Sec. C, 87,139 (June 1978);
35. Rowland C. A., Grinding Calculations Related to the Applications of Large Rod and Ball Mills., *Canadian Mining Journal.*, 93, 6 (1972), 48;

36. Rowland C. A., Kjos D. M., Rod and Ball Mill., Mineral Processing Plant Design, ed Mular A. L. and Bhappu R. B., AIME Trans. (1978), 239;
37. Rowland C. A., Ball Mill Scale-up-Diameter Factors., Advances in Mineral Processing, P. Somasundaran Editor Society of Mining Engineers/AIME, 34 (1986), 605;
38. Schönert, K., La Fractura De Particulas – Proceso Elemental De La Comminucion V Simposiun Sobre Molienda Nov. 1987. Vina Del Mar – Chile;
39. Svarovsky, L., *Hydrocyclones*, Holt, Rinehart & Winston Ltd, Eastbourne, 1984;
40. Wiegel R. L., and Li K. A., Random Model for Mineral Liberation by Size Reduction., Trans. AIME, 238, 179;
41. Wills, B. A. Mineral Processing Technology 4<sup>th</sup> edition –1988;